



Escola d'Enginyeria de Telecomunicació i
Aeroespacial de Castelldefels

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TRABAJO DE FIN DE GRADO

TÍTULO DEL TFG: HYPERLOOP FRENTE AL SECTOR AERONÁUTICO

TITULACIÓN: Grado en Ingeniería de Sistemas Aeroespaciales

AUTORA: Irene Medina Cano

DIRECTORA: Raquel Dolores Rubión Sarbosa

FECHA: 10 de julio del 2020

Título: Hyperloop frente al sector aeronáutico

Autora: Irene Medina Cano

Directora: Raquel Dolores Rubión Sarbosa

Fecha: 10 de julio del 2020

Resumen

En este documento se analiza la viabilidad de implementación del Hyperloop (medio de transporte que utiliza el vacío para anular el rozamiento atmosférico y alcanzar, así, velocidades transónicas). Para ello, teniendo en cuenta que, en la actualidad, el medio de transporte pionero en distancias medias es la aeronave, se ha realizado un estudio comparativo con el sector aeronáutico.

El Hyperloop está actualmente en desarrollo; ha sido diseñado y varias empresas han llevado a cabo algunas pruebas, pero aún no son las definitivas.

Para elaborar el estudio, se han evaluado los diferentes KPIs de ambos medios de transporte. Se ha seguido el ejemplo de la ruta Los Ángeles – San Francisco detallada en *Hyperloop Alpha* para diseñar diferentes trayectos (tanto para el Hyperloop como para la aeronave). También con los datos proporcionados en *Hyperloop Alpha*, se ha determinado cuál sería la inversión inicial necesaria para construir la red de transporte propuesta y se ha obtenido el coste por pasajero transportado para cada trayecto, teniendo en cuenta la amortización de la inversión y otros costes operacionales. Finalmente, se ha estimado el precio de venta al público de los billetes.

Por otra parte, gracias a los informes anuales de las cuentas de distintas aerolíneas, se ha podido determinar, también, el coste de operar esa misma red de transporte en el sector aéreo.

Por último, se ha analizado la seguridad y el impacto ambiental de ambos medios.

Con todo, se ha podido concluir que, el Hyperloop es un medio poco rentable debido a su elevado coste de construcción y se propone el uso de aeronaves eléctricas y, para trayectos largos, aviones supersónicos no contaminantes.

Se considera que el Hyperloop es un medio de transporte atrayente ya que los pasajeros podrían llegar a ahorrar horas en sus viajes, además de no contribuir al efecto invernadero, pero con un precio de venta de los billetes tan elevado, sería prácticamente imposible generar demanda.

Title: Hyperloop versus aeronautical sector

Author: Irene Medina Cano

Director: Raquel Dolores Rubión Sarbosa

Date: July 10th, 2020

Overview

This document analyses the viability of construction of the Hyperloop (transport mode which uses the vacuum to cancel the atmospheric drag so it can reach transonic velocities). Taking into account that the aircraft is the pioneer transport mode in medium and long distances nowadays, a comparative with the aeronautical sector has been done.

The Hyperloop is currently being developed; it has been designed and there are some companies doing tests, but they are not the definitive ones.

To do the study, the KPIs of both the Hyperloop and aircraft have been evaluated. Following the route between Los Angeles and San Francisco described in *Hyperloop Alpha*, five different routes have been designed. It has been computed the cost of the infrastructure of the proposed transport network (also with the information given in *Hyperloop Alpha*). The cost per passenger has been also computed, taking into account the amortization of the investment and other operational costs. Finally, the sale price of the tickets has been estimated.

On the other hand, from the annual accounts report of some airlines, the cost of operating the same transport network with an aircraft has been computed.

In the end, the safety and the environmental impact of both transport modes have been analysed.

It has been concluded that, the construction of the Hyperloop is unprofitable due to its high construction cost. It has been proposed the use of electric airplanes and, for larger routes, non-polluting supersonic aircraft.

It has been considered that the Hyperloop is an attractive mode of transport due to passengers using it could save even hours during their travels and they would not contribute to the greenhouse effect. However, with so large price of the tickets, generate demand would be practically impossible.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi tutora, Raquel, por haberme orientado y ayudado en todo momento, por su total entrega y disponibilidad.

A Héctor Fornes, por guiarme en el mundo financiero.

A mi familia. Gracias por apoyarme incondicionalmente durante la que, sin duda, ha sido la etapa más dura de mi vida y a la que pongo fin con este proyecto.

A mis amigas, por hacerme ver que desconectar de vez en cuando era necesario.

Por último, pero no por ello menos importante, a Alberto. Por acompañarme, aconsejarme y respaldarme siempre.

Nada en la vida es para ser temido, es sólo para ser comprendido. Ahora es el momento de entender más, de modo que podamos temer menos.

– Marie Curie –

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES	2
CAPÍTULO 2. HYPERLOOP: EL CONCEPTO.....	5
2.1. Descripción.....	5
2.2. Principio de funcionamiento	8
2.2.1. Sistema de compresión	8
2.2.2. Sistema de propulsión	8
2.2.3. Sistema de potencia	9
CAPÍTULO 3. DISEÑO DE LOS TRAYECTOS	10
3.1. Criterios para la elección de las rutas.....	10
3.2. Consideraciones previas.....	12
3.3. Diseño de rutas: Hyperloop	15
3.3.1. Barcelona – París	15
3.3.2. Ámsterdam – París	18
3.3.3. Lisboa – Madrid	19
3.3.4. Madrid – Roma	19
3.3.5. París – Roma.....	21
3.4. Diseño de rutas: Aeronave.....	22
3.4.1. Barcelona – París	23
3.4.2. Ámsterdam – París	23
3.4.3. Lisboa – Madrid	24
3.4.4. Madrid – Roma	25
3.4.5. París – Roma.....	25
3.5. Comparación	26
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE LOS COSTES.....	30
4.1. Conceptos financieros básicos	30

4.2. Costes del Hyperloop	31
4.2.1. Inversión inicial	31
4.2.2. Amortización de la inversión inicial	34
4.2.3. Coste operacional.....	35
4.3. Costes del sector aeronáutico	37
4.3.1. Coste operacional.....	37
4.4. Comparación	41
CAPÍTULO 5. COMPARATIVA.....	45
5.1. Seguridad y fiabilidad	45
5.2. Impacto medioambiental	47
5.3. Ventajas del Hyperloop frente a las aeronaves	48
5.4. Desventajas del Hyperloop frente a las aeronaves	49
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES	51
REFERENCIAS	55
ANEXO A. Información complementaria al diseño de rutas del Hyperloop	57
ANEXO B. Gráficas resultantes del diseño de las rutas	63
ANEXO C. <i>Navigation Logs</i> de las rutas diseñadas para el avión	69
ANEXO D. Desglose de costes del Hyperloop.....	75

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1.1	Representación del tráfico de pasajeros en aeropuertos españoles.....	3
Fig. 2.1	Diseño del interior de la cápsula de pasajeros del Hyperloop.....	6
Fig. 2.2	Subsistemas de la cápsula de pasajeros del Hyperloop	6
Fig. 2.3	Cápsula del Hyperloop en el interior del tubo, sobre los pilares y con los paneles solares en el exterior.....	7
Fig. 2.4	Diagrama simplificado del acelerador lineal magnético del Hyperloop.	8
Fig. 3.1	Densidad de tráfico aéreo en Europa en 2018.....	10
Fig. 3.2	Vista aérea de la ruta Barcelona – París.....	15
Fig. 3.3	Perfil de elevación de la ruta Barcelona – París	16
Fig. 3.4	Radio de giro de la ruta Barcelona – París.....	16
Fig. 3.5	Tramos de la ruta Barcelona – París.....	17
Fig. 3.6	Vista aérea de la ruta Ámsterdam – París	18
Fig. 3.7	Vista aérea de la ruta Lisboa – Madrid.....	19
Fig. 3.8	Vista aérea de la ruta Madrid – Roma.....	20
Fig. 3.9	Vista aérea de la ruta París – Roma	21
Fig. 3.10	Diseño de la ruta Barcelona – París en avión	23
Fig. 3.11	Diseño de la ruta Ámsterdam – París en avión.....	24
Fig. 3.12	Diseño de la ruta Lisboa – Madrid en avión	24
Fig. 3.13	Diseño de la ruta Madrid – Roma en avión	25
Fig. 3.14	Diseño de la ruta París – Roma en avión.....	25
Fig. 3.15	Gráficas de la distancia recorrida y velocidad en función del tiempo (Barcelona - París)	26
Fig. 3.16	Gráficas de la distancia recorrida y velocidad en función del tiempo (Ámsterdam – París)	27
Fig. 3.17	Gráficas de la distancia recorrida y velocidad en función del tiempo (Lisboa – Madrid)	27

Fig. 3.18 Gráficas de la distancia recorrida y velocidad en función del tiempo (París – Roma)	28
Fig. 3.19 Gráficas de la distancia recorrida y velocidad en función del tiempo (Madrid – Roma)	29
Fig. 4.1 Coste por AKO (en centésimas de USD) en función de la longitud media de los trayectos (en km)	39
Fig. 4.2 Evolución del precio del combustible (marzo 2019 - marzo 2020)	40
Fig. 5.1 Gráfica comparativa entre el número de accidentes aéreos totales y los causados por meteorología adversa entre 1967 y 2010	45
Fig. 5.2 Coste de la energía por pasajero y por medio de transporte	49
Fig. A.1 Perfil de elevación de la ruta Ámsterdam – París	57
Fig. A.2 Radios de giro de la ruta Ámsterdam – París	57
Fig. A.3 Tramos de la ruta Ámsterdam – París	58
Fig. A.4 Perfil de elevación de la ruta Lisboa – Madrid	58
Fig. A.5 Radios de giro de la ruta Lisboa – Madrid	58
Fig. A.6 Tramos de la ruta Lisboa – Madrid	59
Fig. A.7 Perfil de elevación de la ruta Madrid – Roma	59
Fig. A.8 Radios de giro de la ruta Madrid – Roma	59
Fig. A.9 Tramos de la ruta Madrid – Roma	60
Fig. A.10 Perfil de elevación de la ruta París – Roma	61
Fig. A.11 Radios de giro de la ruta París – Roma	61
Fig. A.12 Tramos de la ruta París – Roma	61
Fig. B.1 Distancia recorrida en función del tiempo (Barcelona – París)	64
Fig. B.2 Velocidad en función del tiempo (Barcelona – París)	64
Fig. B.3 Distancia recorrida en función del tiempo (Ámsterdam – París)	65
Fig. B.4 Velocidad en función del tiempo (Ámsterdam – París)	65
Fig. B.5 Distancia recorrida en función del tiempo (Lisboa – Madrid)	66

Fig. B.6 Velocidad en función del tiempo (Lisboa – Madrid)	66
Fig. B.7 Distancia recorrida en función del tiempo (Madrid – Roma)	67
Fig. B.8 Velocidad en función del tiempo (Madrid – Roma)	67
Fig. B.9 Distancia recorrida en función del tiempo (París – Roma)	68
Fig. B.10 Velocidad en función del tiempo (París – Roma)	68

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1	Aeropuertos con mayor flujo de pasajeros en Europa en 2018	11
Tabla 3.2	Rutas más frecuentes en Europa en el sector aeronáutico.....	11
Tabla 3.3	Detalles de los tramos de la ruta Barcelona – París	17
Tabla 3.4	Detalles de los tramos de la ruta Ámsterdam – París	18
Tabla 3.5	Detalles de los tramos de la ruta Lisboa – Madrid	19
Tabla 3.6	Detalles de los tramos de la ruta Madrid – Roma	20
Tabla 3.7	Detalles de los tramos de la ruta París – Roma.....	21
Tabla 3.8	Tiempo medio de rodadura del verano de 2019 en los diferentes aeropuertos	22
Tabla 4.1	Coste desglosado de los tubos, pilares y túneles para todas las rutas	32
Tabla 4.2	Coste de inversión inicial de la red del Hyperloop	33
Tabla 4.3	Coste de la inversión inicial del Hyperloop por ruta	34
Tabla 4.4	Coste anual de la inversión inicial dividido en rutas	35
Tabla 4.5	Desglose del coste operacional anual del Hyperloop.....	36
Tabla 4.6	Coste por pasajero transportado para el Hyperloop	36
Tabla 4.7	Precio de venta aproximado de los billetes del Hyperloop.....	37
Tabla 4.8	Beneficios anuales del Hyperloop.....	37
Tabla 4.9	Coste por Asiento-Kilómetro Ofrecidos para cada ruta	40
Tabla 4.10	Costes por pasajero transportado para cada ruta	41
Tabla 4.12	Precio del billete y duración de los trayectos, por modo de transporte	42
Tabla 4.13	Parámetros principales de cada ruta para el Hyperloop y la aeronave	43
Tabla D.1	Desglose del coste de una cápsula de pasajeros	76
Tabla D.2	Desglose del coste de la estructura principal	76

INTRODUCCIÓN

Cada vez son más los pasajeros que escogen el transporte aéreo a la hora de viajar, en lugar del terrestre, el marítimo o los raíles. Esto es, en parte, gracias a la aparición y crecimiento de las aerolíneas *low-cost*.

Desde el punto de vista del cliente, viajar en avión supone, en la mayoría de casos, ahorrar tiempo y dinero. Desde el punto de vista de las aerolíneas, un aumento de demanda conlleva también un aumento de ventas y, por lo tanto, de beneficios. Sin embargo, si se analiza objetivamente, el crecimiento del sector aeronáutico implica que sean necesarios más vuelos y, con lo cual, que aumenten las emisiones de gases nocivos, así como la probabilidad de incidencias y retrasos. Por ello, puede parecer una alternativa adecuada la construcción de un medio de transporte más seguro, económico y respetuoso con el medio ambiente.

El Hyperloop es un modo de transporte en desarrollo que, en principio, cumple estos requisitos y, además, es más rápido que un avión.

Los objetivos de este Proyecto de Fin de Grado consisten en estudiar la viabilidad de construcción del Hyperloop, comparando sus características y prestaciones con las de las aeronaves y analizar la afectación de su implementación sobre el sector aeronáutico.

En el primer capítulo se contextualiza y se describe brevemente el sistema.

En el segundo, se analiza en detalle el funcionamiento del Hyperloop, focalizando en los sistemas más importantes del conjunto; el sistema de compresión, de propulsión y de potencia.

Por otra parte, se han diseñado cinco rutas, tanto para el Hyperloop como para la aeronave. Es en el tercer capítulo en el que se describen los diseños y se comparan los resultados obtenidos.

En el cuarto capítulo, se estudian los costes de inversión, así como la amortización y el coste de operación del Hyperloop, considerando que se operan las cinco rutas diseñadas en el capítulo anterior. También se estudia el coste operacional de una aerolínea *Low-cost* y de una *Legacy*.

En el capítulo número cinco se comparan ambos medios de transporte; analizando su seguridad e impacto medioambiental. Además, se analizan las ventajas y desventajas del Hyperloop frente al sector aéreo.

Finalmente, con los resultados obtenidos en los capítulos previos, se han extraído las conclusiones.

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

La necesidad de transportar personas u objetos ha existido desde tiempos inmemorables y por ello, la evolución de los medios de transporte ha sido constante.

Gracias a los avances tecnológicos, el transporte interurbano de carga y/o pasajeros es cada vez más recurrente. Este hecho se puede observar en el notable crecimiento de demanda de los medios pioneros en distancias de medio alcance, tales como el tren de alta velocidad o la aviación comercial y mercantil.

Con un funcionamiento similar al de los trenes, apareció, en el siglo XIX, el tren atmosférico (también conocido como tren neumático). Éste usaba la presión del aire y el vacío como medio de tracción, con la ayuda de tubos neumáticos colocados entre los raíles y pistones. Aunque en su momento fue una idea innovadora y útil para trasladar correo y otros documentos, nunca se llegó a utilizar para transportar pasajeros.

Por otra parte, el tren de alta velocidad consiste en el transporte de viajeros por ferrocarril, y puede llegar a alcanzar velocidades superiores a los 250 km/h. Entró en funcionamiento por primera vez, en 1940 en Japón, pero actualmente está implementado en Europa (España, Italia, Francia y Alemania), Estados Unidos, Brasil, Arabia Saudí, entre otros países además de Japón.

A partir de los trenes de alta velocidad, nació la idea, en 1970, de la levitación magnética, aunque no fue llevada a cabo hasta 2002 en China. Se trata de trenes que levitan sobre un motor magnético. Se dice que levitan porque entre el tren y los raíles, se genera un flujo magnético que impulsa al tren hacia delante, a la vez que lo levanta unos milímetros. Este diseño presenta numerosas ventajas, pues el rozamiento es prácticamente nulo (ya que no hay contacto con los raíles) y su peso es reducido (debido a que el motor que genera el flujo magnético se instala en las vías y no en la estructura del tren).

Es innegable que el sector aeronáutico es, actualmente, el medio de transporte más utilizado para este tipo de distancias. El uso de los aviones en España se encuentra en firme crecimiento desde 2013; hecho que se puede apreciar en la imagen 1.1, elaborada a partir de los datos del departamento de estadística de AENA¹.

Además, según los datos recogidos por la OACI², fueron más de 4.000 millones de personas las que viajaron en avión en todo el mundo en 2018.

¹ Sociedad mercantil estatal que gestiona los aeropuertos y helipuertos españoles de interés general.

² Organismo creado por los Estados en 1944 para ejercer la administración y velar por la aplicación del Convenio sobre Aviación Civil Internacional.



Fig. 1.1 Representación del tráfico de pasajeros en aeropuertos españoles.
Fuente: AENA

Aparentemente, el sector aeronáutico cubre las necesidades de movilidad actuales. No obstante, se debe tener en cuenta que también presenta adversidades tales como los tiempos de espera, los retrasos o la contaminación.

Por otro lado, a pesar de que el desarrollo del tren atmosférico no tuviera éxito comercial, recientemente se ha retomado la idea de utilizar el vacío para el transporte de carga o pasajeros.

Fue Elon Musk³ el que, en 2012, mencionó por primera vez el concepto de Hyperloop. Se trata de un medio de transporte, ideado para trasladar mercancías y/o pasajeros, cuyo funcionamiento se basa en el desplazamiento de una cápsula en tubos prácticamente al vacío. De esta forma, se pretende conseguir que la fricción con el aire sea nula y, por lo tanto, que se alcancen velocidades muy elevadas.

A partir de entonces, varios ingenieros de *Space X*⁴ y *Tesla Motors*⁵ se dedicaron al diseño conceptual del Hyperloop; cuyo resultado se muestra en *Hyperloop Alpha*.

Se trata de un proyecto de código libre o abierto, lo que quiere decir que cualquiera tiene acceso a los diseños y puede mejorarlos. Así, el progreso es mucho más rápido. Por esta razón, Musk invitó a estudiantes y a algunas empresas a aportar ideas para el diseño del Hyperloop. Desde aquel momento, han existido diversos proyectos, pero los más avanzados a nivel internacional son:

³ Nació en Sudáfrica el 28 de junio de 1971. Es un físico, inventor y magnate, cofundador de PayPal, Tesla motors, Space X, Hyperloop, SolarCity, The Boring Company, Neuralink y OpenAI.

⁴ Empresa estadounidense de transporte aeroespacial. Algunos de sus proyectos más relevantes consisten en el desarrollo de los cohetes Falcon 1, Falcon 9 y Falcon Heavy.

⁵ Empresa estadounidense que se dedica al diseño, fabricación y venta de coches eléctricos.

- *Virgin Hyperloop One*: nació en 2014 con la intención de construir rutas por todo el mundo. Pretenden que el sistema esté operativo en 2025. Actualmente ya han construido prototipos y llevado a cabo diversas pruebas.
- *Hyperloop Transportation Technologies (HTT)*: Se trata de una agrupación de 40 compañías (38 países) fundada en 2013. A día de hoy, están realizando experimentos en las instalaciones de prueba construidas en Toulouse. Se estima que la cápsula sea capaz de alcanzar los 1223 km/h y albergue entre 28 y 50 pasajeros.

CAPÍTULO 2. HYPERLOOP: EL CONCEPTO

2.1. Descripción

Una de las razones principales por las que un tren convencional o una aeronave no alcanza mayores velocidades es el rozamiento atmosférico. Si éste fuera nulo, sería posible disminuir notablemente el tiempo de los trayectos. A partir de este planteamiento, surgió el concepto del Hyperloop.

El Hyperloop es un medio de transporte de carga y/o pasajeros que funciona gracias a un sistema de tubos que contienen aire despresurizado, permitiendo así, que una cápsula circule en su interior prácticamente sin fricción atmosférica. El sistema utiliza aire a muy baja presión debido a que es relativamente fácil de mantener si se compara con el vacío y, de esta forma, podría soportar pequeñas variaciones en la densidad del aire. Esta es una diferencia relevante frente a una de las primeras aproximaciones del sistema, propuesta por *Rand Corporation*⁶ y ET3⁷, que consistía en utilizar el vacío para trasladar las cápsulas de pasajeros. Sé descartó debido a que el vacío estricto es extremadamente difícil de crear, así como de mantener, y una pequeña fuga en el sellado de los tubos haría que todo el sistema dejase de funcionar correctamente.

Gracias a su funcionamiento, el hyperloop será capaz de transportar pasajeros y mercancía a una velocidad transónica; 1.220 km/h.

Según el modelo propuesto por *Space X* y *Tesla Motors* en *Hyperloop Alpha* el sistema está formado principalmente por las cápsulas, los tubos y el sistema de propulsión.

Existen dos configuraciones de cápsulas; la que se utilizaría para transportar pasajeros exclusivamente, diseñada para albergar hasta 28 personas y la otra, permitiría transportar, además de pasajeros, tres vehículos del tamaño del Tesla model S.⁸

En la Figura 2.1, se muestra el interior de la cabina de pasajeros. Ha sido diseñada con la intención de conseguir la máxima seguridad y confort (teniendo en cuenta las elevadas aceleraciones a las que estarán sometidos).

⁶ Institución sin ánimo de lucro que ayuda a mejorar la política y la toma de decisiones mediante la investigación y el análisis.

⁷ Consorcio estadounidense dedicado a la implementación global de Tecnologías de Transporte de Tubos de Vacío.

⁸ La longitud del Tesla model S es de 4,979 metros.

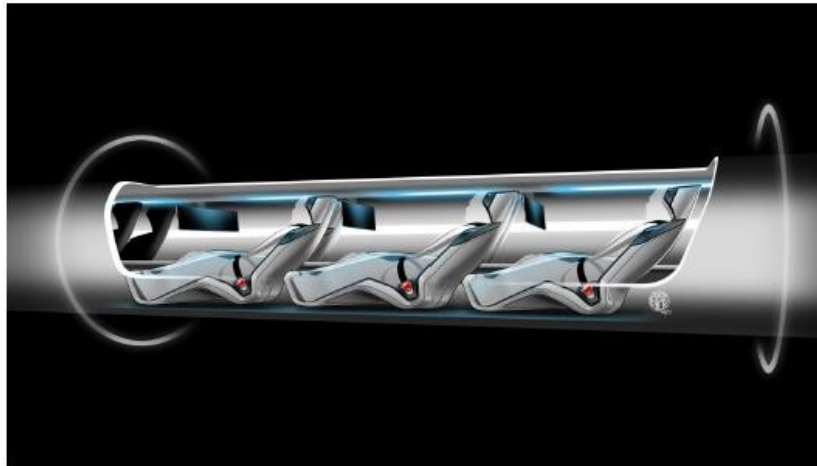


Fig. 2.1 Diseño del interior de la cápsula de pasajeros del Hyperloop.
Fuente: *Hyperloop Alpha*

Por otra parte, los diferentes elementos que componen las cápsulas, además de los asientos, se muestran a continuación.

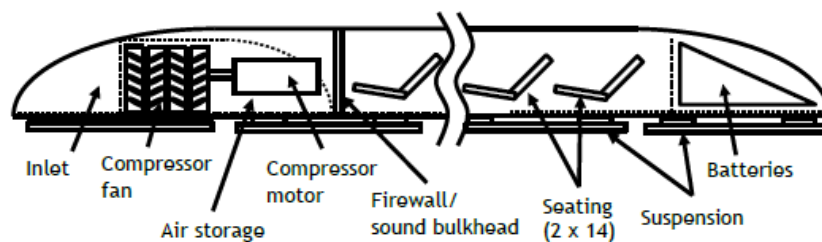


Fig. 2.2 Subsistemas de la cápsula de pasajeros del Hyperloop (no a escala).
Fuente: *Hyperloop Alpha*

Para la levitación de la cápsula, se usa un compresor, ubicado en su parte delantera.

Cabe destacar que la fuente de potencia del sistema son paneles solares, colocados en la superficie del tubo, a lo largo de todo su recorrido. Aun así, son necesarias baterías dónde se almacene energía para utilizar en días nublados o en trayectos nocturnos.

A pesar de que en este diseño no se han incluido las cápsulas para el transporte exclusivo de carga, sería totalmente factible, ya que el funcionamiento del resto del sistema no cambiaría.

Por otro lado, los tubos, que son de acero, han sido dimensionados con la finalidad de que el flujo de aire alrededor de la cápsula sea óptimo, así como el consumo de energía. Se pretende mantener la presión interior a 100 Pa (unas 1.000 veces menor que la presión atmosférica a nivel de mar).

El Hyperloop se alza sobre unos pilares, tal y como se muestra en la Figura 2.3. De este modo, el terreno a comprar será menor, al igual que el impacto que causará sobre la movilidad actual, ya que se podrá cruzar de un lado de la estructura al otro sin tener que rodearla, como se debería hacer en una vía de tren. El impacto sobre el terreno no será mayor que el de un árbol o un poste de telefonía.

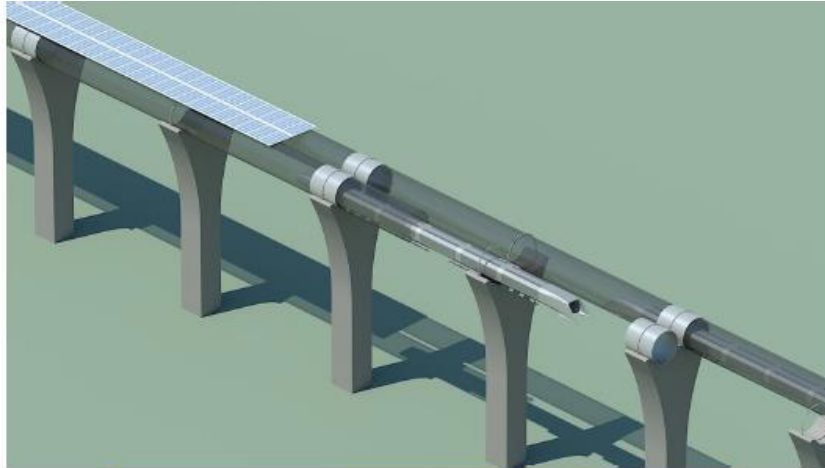


Fig. 2.3 Cápsula del Hyperloop en el interior del tubo, sobre los pilares y con los paneles solares en el exterior. Fuente: *Hyperloop Alpha*

También es importante destacar que las estaciones deberán estar aisladas de los tubos principales para evitar fugas en el sistema. Asimismo, se instalarán salidas de emergencia y puertos de presurización en puntos clave durante el recorrido.

Las tarjetas de embarque se tramitarán de forma electrónica, así como las etiquetas del equipaje facturado. Cada pasajero podrá llevar hasta dos maletas, que juntas deberán pesar, como mucho, 50 kg. Éstas serán almacenadas en la parte final de la cápsula por el personal del Hyperloop. De momento no se ha considerado ningún límite de dimensiones, pero será necesario hacerlo ya que el espacio en la cápsula es limitado.

La zona transitada de las estaciones será amplia y para acceder o salir de las cápsulas, contarán con cámaras de descompresión. De esta forma, una cápsula que llegase a la estación, pararía en una de las cámaras, dónde la presión del aire se igualaría con la de la estación y después, las puertas de la cápsula se abrirían, permitiendo a los pasajeros desembarcar.

Una vez desocupada, la cápsula rotaría en una plataforma de giro y estaría lista para dirigirse a la cámara de descompresión de salida, dónde embarcarían de nuevo los pasajeros y se repetiría el proceso de despresurización antes de partir. El proceso de embarque-desembarque debería ser ágil ya que se pretende que haya hasta tres cápsulas trabajando en paralelo en cada estación.

2.2. Principio de funcionamiento

Las cápsulas del Hyperloop pueden ser transportadas a altas o a bajas velocidades a lo largo del tubo, dependiendo de la zona de la ruta en la que se encuentren. Las cápsulas que circulan dentro de estos tubos, no lo hacen a través de raíles, sino que levitan sobre una capa de aire, generada con aire a presión y con la propia elevación aerodinámica.

Este sistema no requiere de conductor, sino que se puede controlar remotamente y de forma automática.

2.2.1. Sistema de compresión

La parte delantera del vehículo incorpora un compresor con dos finalidades. En primer lugar, aspirar el exceso de aire que no circula entre la cápsula y las paredes, impulsándolo a través de la cápsula y evitando así la acumulación excesiva de aire en la parte delantera, que, sin duda, aumentaría la resistencia del conjunto.

En segundo lugar, el compresor permite producir aire comprimido para la levitación de la cápsula.

Además, parte del aire se aprovecharía para el soporte vital de la cápsula.

2.2.2. Sistema de propulsión

Para impulsar las cápsulas se utilizará un acelerador lineal magnético⁹. El elemento en movimiento del motor (rotor), forma parte de la cápsula, mientras que el tubo incorpora el elemento estacionario (estator), que impulsa el vehículo.

En la Figura 2.4 se muestra el esquema de funcionamiento de dicho acelerador. El tubo está recubierto de bobinas, que generan un campo magnético. Éste acelera el proyectil (cápsula del Hyperloop) a medida que se acerca. Cuando pasa por el punto central de la primera bobina, ésta se desconecta y la siguiente se enciende, acelerando cada vez más el proyectil.

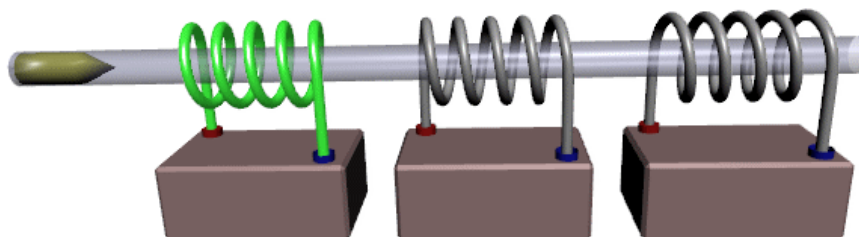


Fig. 2.4 Diagrama simplificado del acelerador lineal magnético del Hyperloop.
Fuente: *ZeroOne technologies*

⁹ También conocido como “cañón de Gauss”, es un tipo de tubo que usa una sucesión de electroimanes para acelerar magnéticamente un proyectil a gran velocidad.

Por otro lado, teniendo en cuenta que el Hyperloop podría atravesar áreas urbanas, la velocidad no puede ser máxima y constante todo el tiempo. Por ello, el sistema de propulsión deberá cumplir los siguientes requisitos:

- Acelerar la cápsula de 0 a 480 km/h en las zonas urbanas.
- Mantener esa velocidad el tiempo necesario.
- Acelerar de 480 km/h a 1.220 km/h en las zonas que lo permitan (con una aceleración máxima de 0,5g).
- Desacelerar la cápsula.

2.2.3. Sistema de potencia

Se estima que la potencia media anual necesaria del sistema completo sea de 28.000 CV (incluyendo la potencia para que el motor funcione de forma eficiente, teniendo en cuenta la carga de baterías que alimentan a los compresores a bordo, etc.). Si en la parte superior del tubo del Hyperloop (considerando una ruta de 600 km aproximadamente) se colocasen paneles solares, estos proporcionarían hasta 76.000 CV de media anual, cifra más que suficiente para cumplir con los requisitos.

Por otra parte, cabe considerar que la potencia de pico al acelerar o desacelerar las cápsulas es hasta tres veces mayor que la media, por lo que la arquitectura de potencia incluye un conjunto de baterías en cada acelerador. De esta manera, las placas solares sólo proporcionan la potencia media necesaria para arrancar el sistema.

Sólo se utilizaría la energía de la red eléctrica cuando la solar no estuviera disponible.

CAPÍTULO 3. DISEÑO DE LOS TRAYECTOS

Para poder comparar el Hyperloop frente al sector aeronáutico, se han diseñado diferentes rutas (para ambos medios de transporte) teniendo en cuenta una serie de consideraciones. En este capítulo se detalla el diseño de cada una de ellas, así como las contemplaciones previas necesarias.

3.1. Criterios para la elección de las rutas

En primer lugar, se ha creído conveniente diseñar rutas que actualmente estén muy solicitadas en el sector aéreo ya que estimular demanda, teniendo en cuenta que se trata un medio de transporte innovador, sería más complicado.

Cabe destacar que la ruta Los Ángeles – San Francisco ha sido diseñada en *Hyperloop Alpha*¹⁰. Así pues, existiendo ya una ruta en EEUU y sabiendo que el tráfico de pasajeros entre ciudades europeas es mayor que entre ciudades españolas, se ha considerado estudiar rutas que conecten diferentes puntos de Europa.

Para que la construcción del Hyperloop sea lo más rentable posible, es imprescindible conocer cuáles son las zonas con mayor tránsito de aeronaves, así como los trayectos más demandados. Con esta finalidad se ha recurrido a la Figura 3.1, elaborada a partir de los datos proporcionados por *Flightradar24*¹¹. En esta imagen se muestra el número de vuelos en Europa por cada 0,5° de latitud. Los colores cálidos representan mayor tráfico aéreo.

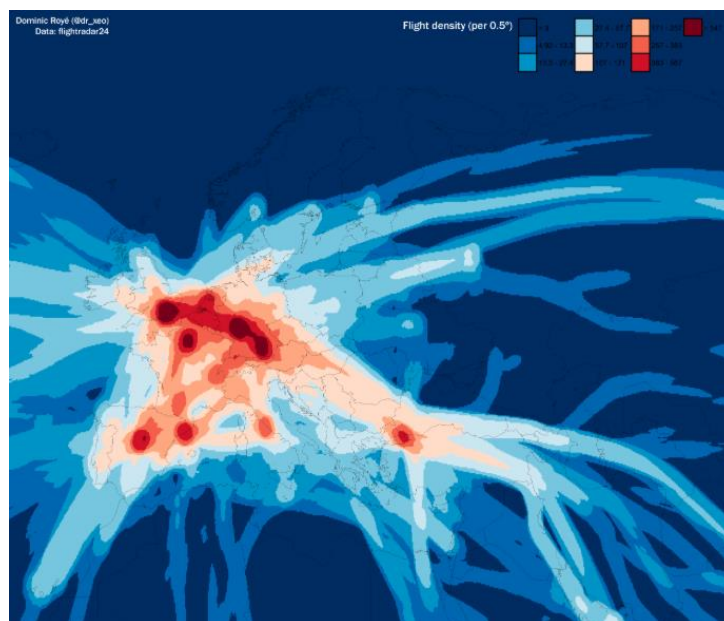


Fig. 3.1 Densidad de tráfico aéreo en Europa en 2018. Fuente: *Flightradar24*

¹⁰ Se recuerda que *Hyperloop Alpha* es el documento donde se recogen las especificaciones técnicas, el diseño de la ruta L.A – S.F y otras características del Hyperloop, elaborado por *Space X* y *Tesla Motors*.

¹¹ Servicio que presta información del seguimiento de vuelos en tiempo real.

Las zonas con un tránsito de aeronaves más denso se corresponden con las inmediaciones de aeropuertos con mayor movimiento. Por lo tanto, conectar esas ciudades podría ser una opción para el Hyperloop.

Tabla 3.1 Aeropuertos con mayor flujo de pasajeros en Europa en 2018.

Fuente: *Eurostat*

Posición	País	Aeropuerto	Tránsito de pasajeros (en miles de pasajeros)
1	UK	London/Heathrow	75.672
2	FR	París/Charles de Gaulle	65.849
3	NL	Ámsterdam/Schiphol	63.550
4	DE	Frankfurt/Main	60.669
5	ES	Madrid/Barajas	49.178
6	ES	Barcelona/El Prat	43.750
7	UK	London/Gatwick	43.143
8	DE	Múnich	42.159
9	IT	Roma/Fuimicino	41.569
10	FR	París/Orly	31.238

Con la información de la Tabla 3.1, que complementa al mapa de calor, se podría hacer una estimación de las rutas más habituales del sector aeronáutico en Europa, pero para lograr una mayor precisión, se ha recurrido a un estudio de mercado a través de una herramienta de IATA¹². Este estudio se basa en el análisis de datos de capacidad de distintas aerolíneas. A partir de esta información, se han podido conocer las rutas europeas más operadas.

Tabla 3.2 Rutas más frecuentes en Europa en el sector aeronáutico.

Fuente: IATA

Barcelona - París
Madrid - París
París - Roma
Milán - París
Lisboa - París
Madrid - Roma
Lisboa - Madrid
Oporto - París
Barcelona - Roma
Ámsterdam - París
Frankfurt - Viena

¹² *International Air Transport Association*. Es una asociación, creada en 1919, para la cooperación entre aerolíneas, promoviendo la seguridad, fiabilidad y economía en el transporte aéreo.

Es preciso mencionar que se ha descartado cualquier ruta que supusiera cruzar el mar, como Londres - Ámsterdam, por ejemplo, ya que aumentaría el coste de la infraestructura notablemente. Tampoco se han considerado las rutas nacionales debido a que, tal y como se ha mencionado, están menos recurridas que las de nivel europeo.

Con esta información y, teniendo en cuenta cuáles son los destinos más reiterados, se ha optado por diseñar las siguientes cinco rutas: Barcelona – París, Ámsterdam – París, Lisboa – Madrid, Madrid – Roma y París – Roma. Con estos trayectos, quedaría diseñada la primera red de Hyperloop en Europa, pudiendo ser ampliada en caso de obtener conclusiones favorables para este medio de transporte. Una posible extensión consistiría en añadir el tramo Madrid-Barcelona y así prestar servicio también a las rutas Madrid-París y Lisboa-París, pasando por Barcelona.

3.2. Consideraciones previas

Tal y como se recoge en *Hyperloop Alpha*, hay una serie de requisitos que se deben tener en cuenta a la hora de trazar rutas para el Hyperloop, detallados a continuación:

1. Mantener el tubo tan próximo a las carreteras existentes como sea posible. De esta forma, se consigue que el impacto visual sea el mínimo.
2. Limitar las aceleraciones (tanto lineal como centrípeta) a 0,5g. Se considera que ésta es la aceleración inercial máxima que puede soportar confortablemente el cuerpo humano en periodos cortos. Para reducir las aceleraciones inerciales experimentadas por los pasajeros, se estudia que la cápsula incorpore un mecanismo que permita cierta inclinación.
3. Evitar, en la medida de lo posible, atravesar áreas urbanas, aeropuertos, parques naturales, zonas montañosas, etc.

Por otra parte, la velocidad de la cápsula se debe limitar a:

- 480 km/h en áreas urbanas.
- 480 km/h en zonas donde, por necesidades geográficas, los radios de giro sean inferiores a 1,6 km.
- 1.220 km/h en zonas con radios de giro mayores de 4,8 km.

Para evitar giros pronunciados que limiten la velocidad de la cápsula, así como los cambios bruscos de elevación, es esencial optimizar la ruta. Para ello, será necesario estudiar las diferentes situaciones y escoger la solución más económica y adecuada. En caso de que seguir la trayectoria de la carretera suponga realizar una curva muy cerrada, el tubo se podrá alejar de ésta. Se permitiría actuar de igual manera si seguir la carretera supusiese hacer un rodeo innecesario para la ruta del Hyperloop.

Por otra parte, se podrá allanar el terreno, variar la altura de los pilares que sostienen el tubo o construir túneles siempre que haya un desnivel considerable.

Para diseñar los trayectos, se ha seguido el ejemplo Los Ángeles – San Francisco detallado en *Hyperloop Alpha*.

En primer lugar, utilizando Google Earth Pro, se han unido origen y destino, procurando que el trazo sea lo más regular y recto posible. En caso de que hubiera un desnivel excesivo, se ha redirigido la ruta para disminuirlo y de no ser posible, se ha considerado la opción de construir túneles. También se ha desviado ligeramente la ruta en los tramos que atravesaban ciudades, siempre que se ha podido. De lo contrario, la velocidad de la cápsula se ha ajustado a 480 km/h.

Con la finalidad de analizar las limitaciones de velocidad, se han trazado circunferencias tangentes a todos los giros. De esta forma se ha sabido si los radios suponían una restricción para la velocidad.

Las trayectorias se han aproximado a un movimiento rectilíneo uniforme, para tramos con velocidad constante y a un movimiento rectilíneo uniformemente acelerado para los tramos no constantes.

Se han aplicado los conceptos básicos de cinemática sobre ambos movimientos, detallados a continuación, para determinar el tiempo y recorrido necesarios en cada tramo.

En las zonas donde se ha considerado un MRUA¹³, se conocía la velocidad inicial, la final y la aceleración, por lo que se ha aislado Δx de la ecuación 3.3 (que es una combinación de la 3.1 y 3.2) para conocer la distancia necesaria. Después, se ha obtenido el tiempo con la ecuación 3.1. La suma de los tiempos de cada tramo supone el tiempo total del trayecto en Hyperloop.

$$x = x_0 + v_0 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 \quad (3.1)$$

$$v = v_0 + a \cdot t \quad (3.2)$$

$$v^2 = v_0^2 + 2 \cdot a \cdot \Delta x \quad (3.3)$$

Por otro lado, en los tramos con MRU¹⁴, se conocía Δx y únicamente ha sido necesario aislar Δt de la ecuación 3.4.

¹³ Movimiento Rectilíneo Uniformemente Acelerado.

¹⁴ Movimiento Rectilíneo Uniforme.

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (3.4)$$

Dado que el objetivo en las rutas del Hyperloop es que la cápsula circule a 1.220 km/h el máximo tiempo posible, la aceleración en el resto de tramos será máxima (0,5g). De esta forma, los tramos con menores velocidades, serán lo más cortos posible.

Dependiendo de las características de cada ruta, los tramos pueden variar, pero en general, siguen la siguiente estructura:

- De 0 a 480 km/h: Pasando previamente los datos a SI, se ha aislado Δx de 3.3, obteniendo la expresión 3.5. Al sustituir, se ha obtenido que serán necesarios, al menos, 1,81 km para acelerar de 0 km/h a 480 km/h con una aceleración de 0,5g.

Con la ecuación 3.6, que se ha obtenido de aislar la 3.1, se ha calculado el tiempo que tardará la cápsula en recorrer los 1,81 km. Se ha seguido el mismo procedimiento para el resto de tramos.

$$\Delta x = \frac{v^2 - v_0^2}{2 \cdot a} \quad (3.5)$$

$$\Delta x = 1,81 \text{ km}$$

$$t = \frac{-v_0 \pm \sqrt{v_0^2 + 4 \cdot \frac{1}{2} \cdot a \cdot x}}{a} \quad (3.6)$$

$$t = 27,16 \text{ s}$$

- En la mayoría de rutas, ha sido necesario añadir un tramo a 480 km/h (constante) por el hecho de seguir circulando por área urbana.
- De 480 km/h a 890 km/h: se necesitan 4,4 km y 27,16 segundos.
- De 890 km/h a 1.220 km/h: se necesitan 5,5 km y 18,76 segundos.
- Tramo a velocidad constante de 1.220 km/h: depende de la longitud de la ruta y del resto de tramos.
- Frenado: La velocidad disminuye de la misma forma que ha aumentado, es decir, de 1.220 km/h a 890 km/h con una desaceleración de 0,5g, y así con el resto hasta llegar a 0 km/h.

Una vez se ha dividido el trayecto en tramos y se han obtenido los datos necesarios de cada uno de ellos, se ha procedido a diseñar las rutas en avión, mediante *SkyVector*¹⁵.

Finalmente, para comparar las rutas con ambos medios de transporte, se han elaborado una serie de gráficas utilizando MATLAB¹⁶.

3.3. Diseño de rutas: Hyperloop

3.3.1. Barcelona – París

A continuación, se muestra la ruta diseñada con Google Earth Pro entre las capitales de Catalunya y Francia, respectivamente.



Fig. 3.2 Vista aérea de la ruta Barcelona – París. Fuente: *Google Earth Pro*

La trayectoria dista mucho de una línea recta, que, a priori, podría parecer la mejor opción. Se ha escogido esta trayectoria con el fin de evitar los Pirineos y demás zonas que suponen un gran desnivel, así como las áreas urbanas. A pesar de ello, tal y como se aprecia en la Figura 3.3, la ruta tiene un perfil irregular, por lo que será necesario construir túneles. Considerando sólo los tramos esenciales, se necesitarán 508 km de túnel en total.

¹⁵ Principal proveedor de cartas aeronáuticas y servicios relacionados con la planificación de vuelos a nivel mundial.

¹⁶ Software de programación matemático.

Por otro lado, también se variará la altura de los pilares que sustentan el tubo del Hyperloop con tal de conseguir pendientes poco pronunciadas. Siguiendo el modelo diseñado en *Hyperloop Alpha*, se ha considerado un espaciado entre pilares de 30 m, por lo que, en una ruta de 988 km como ésta, serán necesarias 32.933 unidades en total.



Fig. 3.3 Perfil de elevación de la ruta Barcelona – París.
Fuente: *Google Earth Pro*

Antes de dividir la ruta en tramos, se han comprobado las posibles restricciones de velocidad; por tener curvas pronunciadas o por circular en zonas urbanas.

En la imagen 3.4, aparecen las circunferencias trazadas para estudiar los radios de giro. Suponen una limitación para la velocidad las curvas anteriores a Carcasona. Además, en esa misma zona, se atraviesan poblaciones. Con lo cual, una velocidad de 480 km/h es adecuada por ambos motivos.

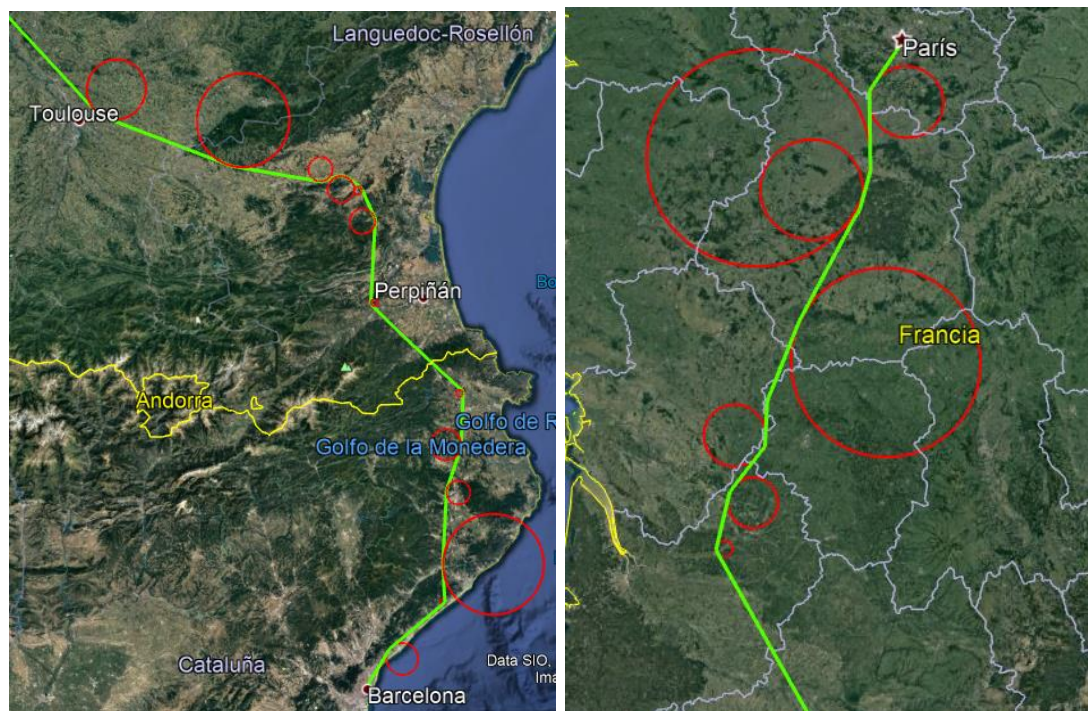


Fig. 3.4 Radios de giro de la ruta Barcelona – París. Fuente: *Google Earth Pro*

A partir de Carcasona, no existe ningún tipo de limitación debido a los giros. De esta forma, la ruta se ha dividido en siete tramos, que se pueden observar en las siguientes imágenes. Las características de cada tramo se detallan en la Tabla 3.3.

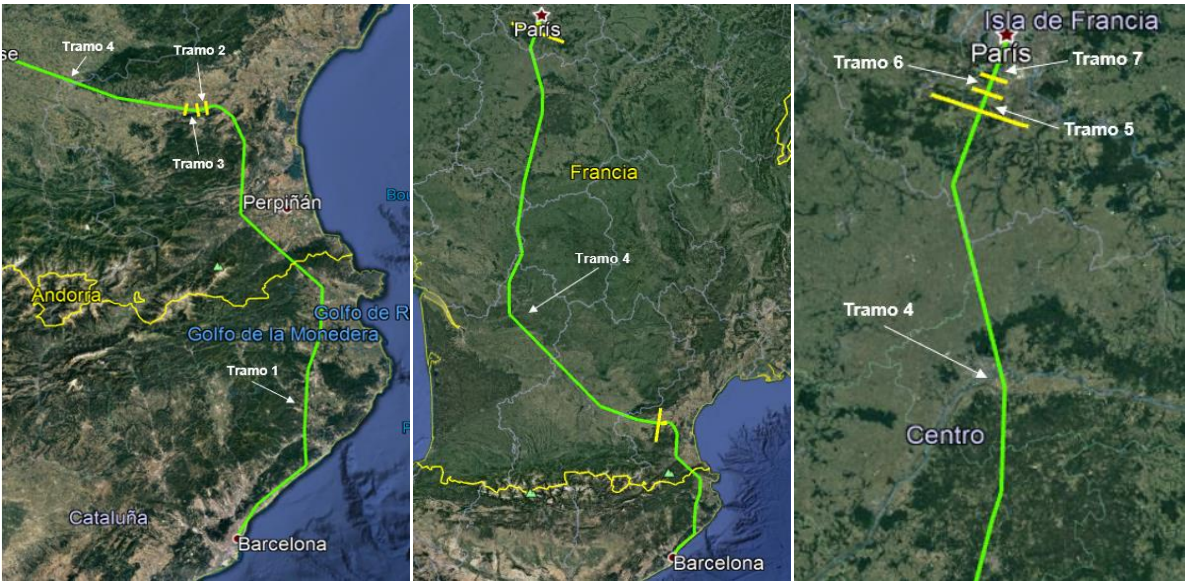


Fig. 3.5 Tramos de la ruta Barcelona – París. Fuente: Google Earth Pro

Tabla 3.3 Detalles de los tramos de la ruta Barcelona – París. Fuente propia

	Tramo	v_o (km/h)	v_f (km/h)	Δx (km)	Δt (s)
1	Subtramo 1	0	480	1,81	27,16
	Subtramo 2	480	480	239,91	1.799,8
	2	480	890	4,4	23,15
	3	890	1.220	5,5	18,76
	4	1.220	1.220	711,48	2.099,4
	5	1.220	890	5,5	18,76
	6	890	480	4,4	23,15
7	Subtramo 1	480	480	13,19	98,95
	Subtramo 2	480	0	1,81	27,16
Total:				988 km	1h 9 min

El primer tramo consta de dos partes: una donde se acelera hasta los 480 km/h y otra con velocidad constante de 480 km/h. De esta forma, la aceleración es máxima y se alcanza la velocidad deseada rápidamente. El último tramo ha sido también dividido en subtramos con el mismo objetivo; circular a 480 km/h el máximo tiempo posible.

Dado que se ha seguido el mismo proceso para el diseño del resto de rutas, en adelante sólo se muestra la imagen del trazado y la tabla resumen para cada trayecto. Si se desea ver el perfil de elevación del terreno, los radios de giro y la división de tramos para cada uno de ellos, consúltese el Anexo A.

3.3.2. Ámsterdam – París

La ruta diseñada entre Ámsterdam y París se muestra en la Figura 3.6 y los detalles en la Tabla 3.4. En esta ocasión, la trayectoria es más directa que en la anterior a pesar de que cuenta con pequeños rodeos para evitar ciudades y grandes desniveles en el terreno. Serán necesarios 14.967 pilares y 27 km de túnel en un total de 449 km.



Fig. 3.6 Vista aérea de la ruta Ámsterdam – París. Fuente: *Google Earth Pro*

Tabla 3.4 Detalles de los tramos de la ruta Ámsterdam – París. Fuente propia

	Tramo	v_o (km/h)	v_f (km/h)	Δx (km)	Δt (s)
1	Subtramo 1	0	480	1,81	27,16
	Subtramo 2	480	480	7,19	53,94
	2	480	890	4,4	23,15
	3	890	1.220	5,5	18,76
	4	1.220	1.220	385,2	1.136,62
	5	1.220	890	5,5	18,76
	6	890	480	4,4	23,15
7	Subtramo 1	480	480	33,19	248,31
	Subtramo 2	480	0	1,81	27,16
Total:				449 km	26 min 17 s

3.3.3. Lisboa – Madrid

Se trata de una ruta de 538 km de longitud que une la capital portuguesa con la española dando pequeños rodeos, de nuevo, para evitar pendientes pronunciadas y atravesar ciudades.

Se necesitarán 118 km de túnel y 17.934 pilares de diferentes tamaños.



Fig. 3.7 Vista aérea de la ruta Lisboa – Madrid. Fuente: *Google Earth Pro*

Tabla 3.5 Detalles de los tramos de la ruta Lisboa – Madrid. Fuente propia

	Tramo	v_o (km/h)	v_f (km/h)	Δx (km)	Δt (s)
1	Subtramo 1	0	480	1,81	27,16
	Subtramo 2	480	480	17,19	128,96
	2	480	890	4,4	23,15
	3	890	1.220	5,5	18,76
	4	1.220	1.220	474,2	1.399,23
	5	1.220	890	5,5	18,76
	6	890	480	4,4	23,15
7	Subtramo 1	480	480	23,19	173,97
	Subtramo 2	480	0	1,81	27,16
Total:				538 km	30 min 40 s

3.3.4. Madrid – Roma

Se trata de la ruta más larga de todas las estudiadas; cuenta con 1.604 km en total. Pese a que se ha estudiado la posibilidad de trazarla siguiendo la costa, finalmente se ha decidido atravesar tanto los Pirineos como los Alpes suizos ya

que, de todas formas, era necesaria la construcción de túneles y la distancia a recorrer aumentaba considerablemente.

De esta manera, se necesitarán 397 km de túnel en toda la ruta y 53.467 pilares.

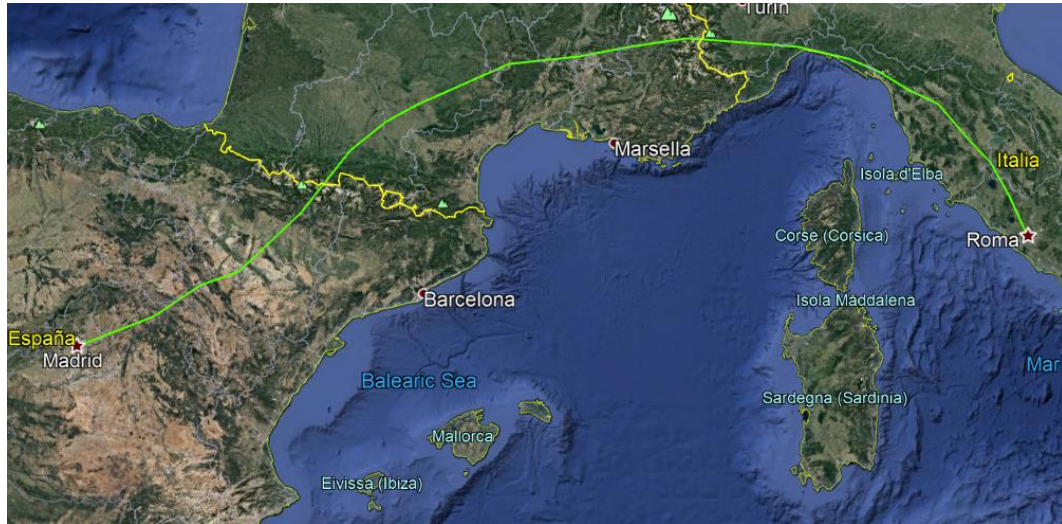


Fig. 3.8 Vista aérea de la ruta Madrid – Roma. Fuente: *Google Earth Pro*

Tabla 3.6 Detalles de los tramos de la ruta Madrid – Roma. Fuente propia

	Tramo	v_o (km/h)	v_f (km/h)	Δx (km)	Δt (s)
1	Subtramo 1	0	480	1,81	27,16
	Subtramo 2	480	480	41,19	309,00
	2	480	890	4,4	23,15
	3	890	1.220	5,5	18,76
	4	1.220	1.220	1.151,9	3.398,94
	5	1.220	890	5,5	18,76
	6	890	480	4,4	23,15
	7	480	480	209,0	1.567,90
	8	480	890	4,4	23,15
	9	890	1.220	5,5	18,76
	10	1.220	1.220	151,5	447,03
	11	1.220	890	5,5	18,76
	12	890	480	4,4	23,15
13	Subtramo 1	480	480	7,19	53,94
	Subtramo 2	480	0	1,81	27,16
Total:				1.604 km	1h 40 min

Se han tenido que añadir más tramos en esta ruta ya que no ha sido posible rodear algunas ciudades y, por lo tanto, se ha reducido la velocidad en mitad del trayecto.

3.3.5. París – Roma

Esta ruta cuenta con 1.175 km en total, 700 de los cuales han podido trazarse prácticamente en línea recta. A partir de Milán, ha sido necesario bordear algunas ciudades para poder seguir circulando a velocidad máxima.

Serán necesarios un total de 335 km de túnel y 39.167 pilares de diferentes alturas.

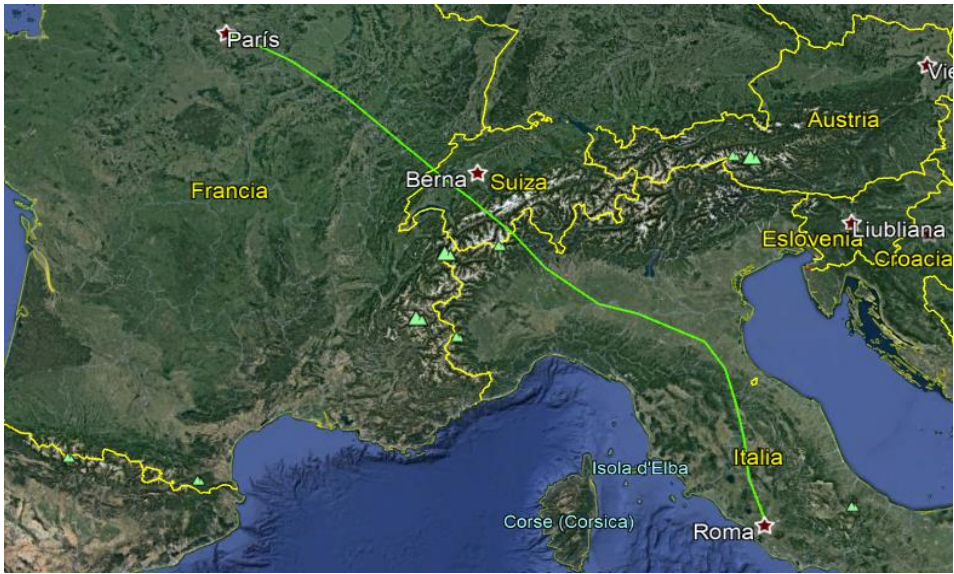


Fig. 3.9 Vista aérea de la ruta París – Roma. Fuente: Google Earth Pro

Tabla 3.7 Detalles de los tramos de la ruta París – Roma. Fuente propia

Tramo		v_o (km/h)	v_f (km/h)	Δx (km)	Δt (s)
1	Subtramo 1	0	480	1,81	27,16
	Subtramo 2	480	480	25,19	188,97
2		480	890	4,4	23,15
3		890	1.220	5,5	18,76
4		1.220	1.220	1.120,2	3.305,40
5		1.220	890	5,5	18,76
6		890	480	4,4	23,15
7	Subtramo 1	480	480	6,19	46,43
	Subtramo 2	480	0	1,81	27,16
Total:				1.175 km	1 h 1 min

3.4. Diseño de rutas: Aeronave

Para poder comparar ambos medios, una vez diseñadas las rutas para el Hyperloop, se han diseñado las mismas trayectorias en avión.

Con la finalidad de tomar una velocidad de referencia que introducir en *SkyVector*, se ha considerado un modelo de aeronave típico, sobre todo, en aerolíneas low-cost para distancias cortas y/o medias; el Airbus A320. Se trata de un modelo que permite una velocidad de crucero de 829 km/h (448 nudos) y una máxima operativa de 871 km/h (470 nudos).

Sin considerar otros aspectos, la velocidad a introducir en el programa sería, pues, de 448 nudos. Dado que las aerolíneas persiguen un consumo de combustible eficiente, la velocidad de crucero que utilizan suele ser inferior a la que indica el fabricante. En función de la longitud de la ruta, la velocidad varía. Por ello, en este estudio se han considerado velocidades de 320, 380 y 400 nudos según la distancia a recorrer en cada trayecto.

Se ha asumido una altitud de vuelo en crucero de 35.000 pies (FL350) siempre que la longitud del trayecto permita al avión alcanzar esa altitud. En caso contrario, se ha ajustado una altitud para cada ruta en particular.

El tiempo de trayecto proporcionado por *SkyVector* no incluye la rodadura del avión. Para hacer una comparación más realista, se han extraído de Eurocontrol los tiempos de rodadura de llegada y de salida de los distintos aeropuertos.

Tabla 3.8 Tiempo medio de rodadura del verano de 2019 en los diferentes aeropuertos. Fuente: Eurocontrol

Aeropuerto	<i>Taxi-in</i> (min)	<i>Taxi-out</i> (min)
Barcelona – El Prat	-	18,4
París – Charles de Gaulle	9,8	16,0
Ámsterdam – Schiphol	-	14,2
Lisboa – Portela	-	14,0
Madrid – Barajas	9,3	18,5
Roma – Fiumicino	8,4	-

Añadiendo estos tiempos a los resultantes de *SkyVector*, se obtienen los tiempos bloque¹⁷.

¹⁷ Se considera *tiempo bloque* el tiempo que pasa desde que se retiran los calzos del avión en el origen hasta que se colocan en el destino.

De cada vuelo, se ha extraído un *navigation log*, generado automáticamente por el programa y en el que se pueden apreciar los detalles del trayecto. Estos documentos se encuentran en el Anexo C.

3.4.1. Barcelona – París

Teniendo en cuenta la longitud de la ruta, se ha introducido una velocidad de 380 nudos. El tiempo resultante es de 1 hora y 33 minutos, pero, añadiendo el tiempo de rodadura correspondiente, se ha obtenido una duración del trayecto de 2 horas y 1 minuto.

En la imagen 3.10 se puede observar la ruta creada.

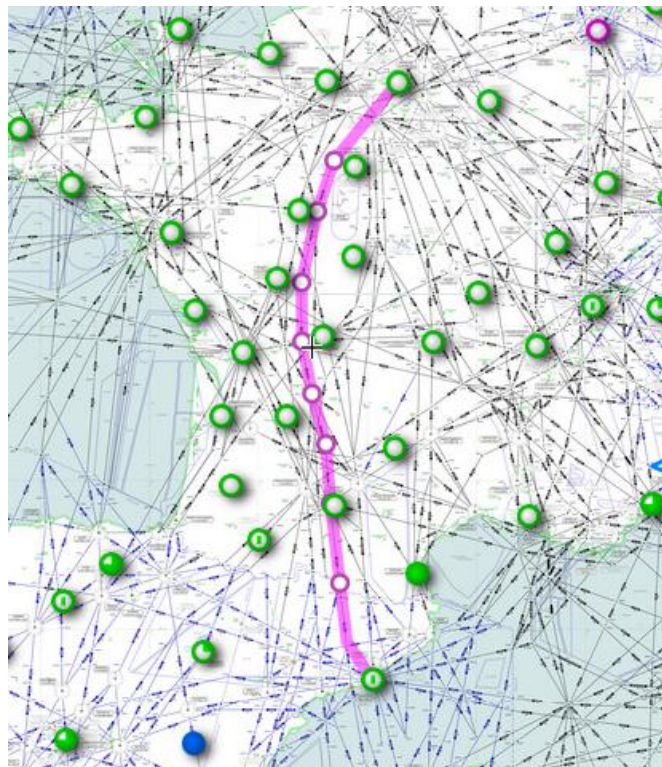


Fig. 3.10 Diseño de la ruta Barcelona – París en avión. Fuente: *SkyVector*

3.4.2. Ámsterdam – París

Se trata de una ruta demasiado corta para que la aeronave alcance los 35.000 pies, por lo que la altitud de crucero que se ha introducido es de 20.000 pies.

Dado que es una ruta breve, se ha escogido una velocidad de 320 nudos. Así, la duración sería de unos 46 minutos. Si se añade el tiempo de rodadura, un avión tardaría 1 hora y 10 minutos aproximadamente en realizar el trayecto.

En la siguiente figura se muestra la ruta diseñada.

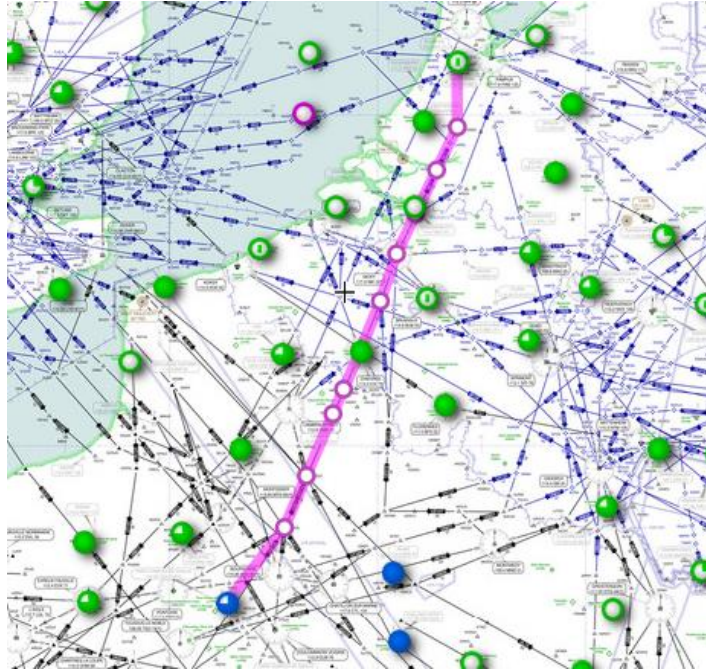


Fig. 3.11 Diseño de la ruta Ámsterdam – París en avión. Fuente: *SkyVector*

3.4.3. Lisboa – Madrid

Al tratarse de un trayecto algo más extenso que el anterior, la altitud ha podido ajustarse hasta FL250, pero no ha sido posible alcanzar los 35.000 pies.

Con una velocidad de 320 nudos, el tiempo del trayecto es de 58 minutos. Añadiendo los *taxi times* correspondientes, serían necesarios 1 hora y 21 minutos para realizar esta ruta en avión.



Fig. 3.12 Diseño de la ruta Lisboa – Madrid en avión. Fuente: *SkyVector*

3.4.4. Madrid – Roma

Esta es una de las rutas que permiten una altitud de crucero de 35.000 pies y una velocidad de 400 nudos. El tiempo del trayecto es de 2 horas y 3 minutos, pero, con la rodadura incluida, es de 2 horas y 29 minutos.

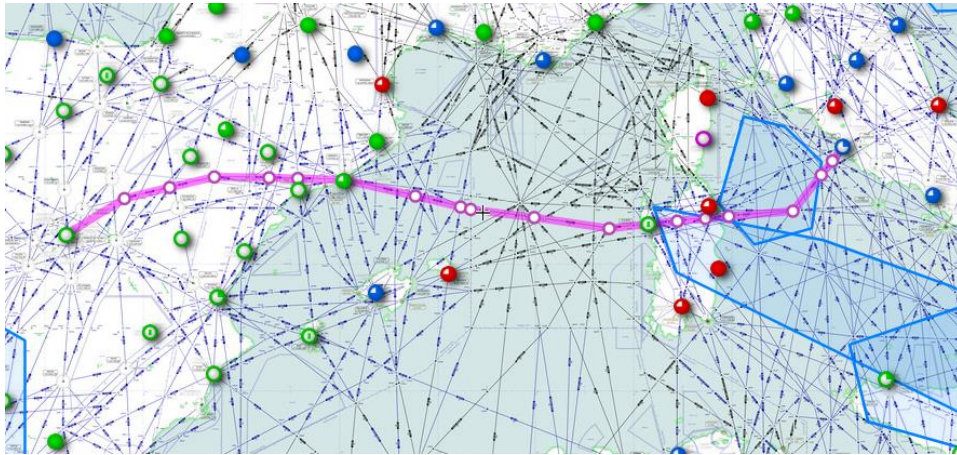


Fig. 3.13 Diseño de la ruta Madrid – Roma en avión. Fuente: *SkyVector*

3.4.5. París – Roma

Con una velocidad de 400 nudos y FL350 como altitud de crucero, el tiempo del trayecto es de 1 hora y 48 minutos. Incluyendo el tiempo de rodadura; 2 horas y 12 minutos.

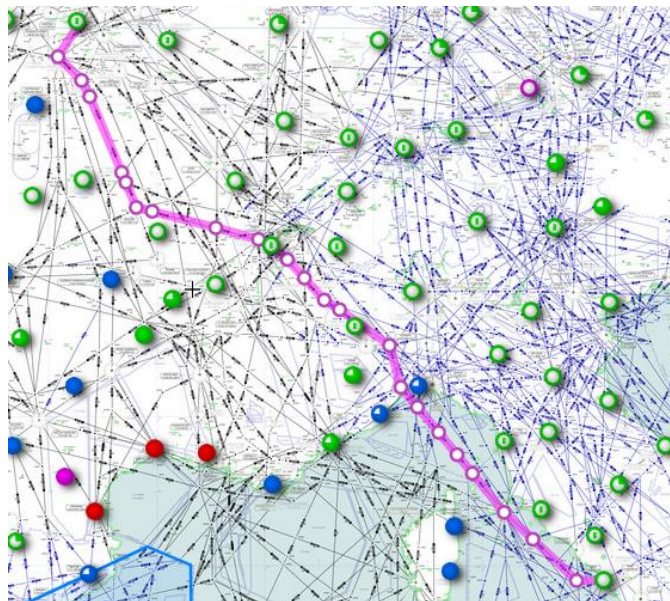


Fig. 3.14 Diseño de la ruta París – Roma en avión. Fuente: *SkyVector*

3.5. Comparación

Tal y como se ha mencionado anteriormente, para poder analizar los trayectos con ambos medios de transporte más detalladamente, se han elaborado dos gráficas para cada ruta; en la primera se representa la distancia recorrida en función del tiempo, mientras que, en la segunda, la velocidad en función del tiempo.

Los datos de la ruta en avión introducidos en las gráficas provienen del *navigation log* extraído de *SkyVector*, por lo que en la duración del trayecto no se incluye la rodadura.

Todas ellas se presentan y comentan a continuación. Para observar las mismas gráficas ampliadas, véase el Anexo B.

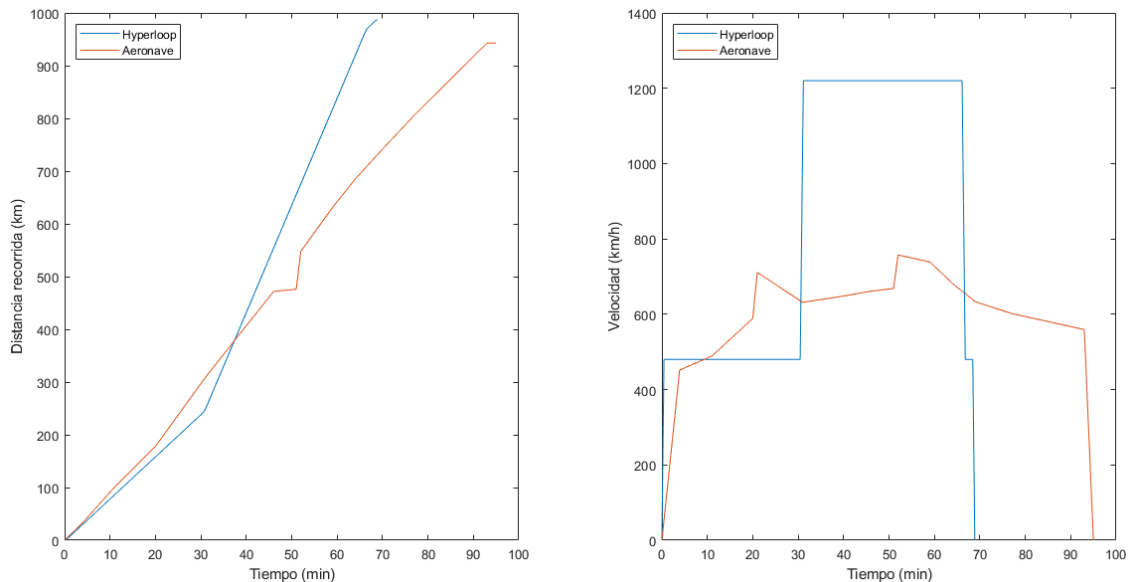


Fig. 3.15 Gráficas de la distancia recorrida y velocidad en función del tiempo (Barcelona - París). Fuente propia

En esta ruta, el Hyperloop debe circular durante más tiempo de lo habitual a 480 km/h. Esto hace que, como se observa en ambas gráficas, haya dos tramos evidentes en su curva. Por ello también, en el gráfico de la distancia, la pendiente de la curva roja supera a la azul durante cierto tiempo. Es decir, la velocidad del avión es mayor durante ese periodo.

Además, la distancia recorrida por el Hyperloop es mayor que la recorrida por la aeronave. Aun así, el tiempo del trayecto en Hyperloop es inferior al de la ruta en avión ya que el tramo en que éste circula a 1.220 km/h compensa el anterior más lento.

También se aprecia, en la figura de la derecha que el perfil de velocidad del avión es bastante irregular. Esto se debe a que *SkyVector* tiene en cuenta la velocidad

y dirección del viento, por lo que, la velocidad de la aeronave puede verse incrementada o disminuida momentáneamente. En el Anexo C se puede consultar la velocidad de cada tramo para el avión, así como las condiciones meteorológicas.

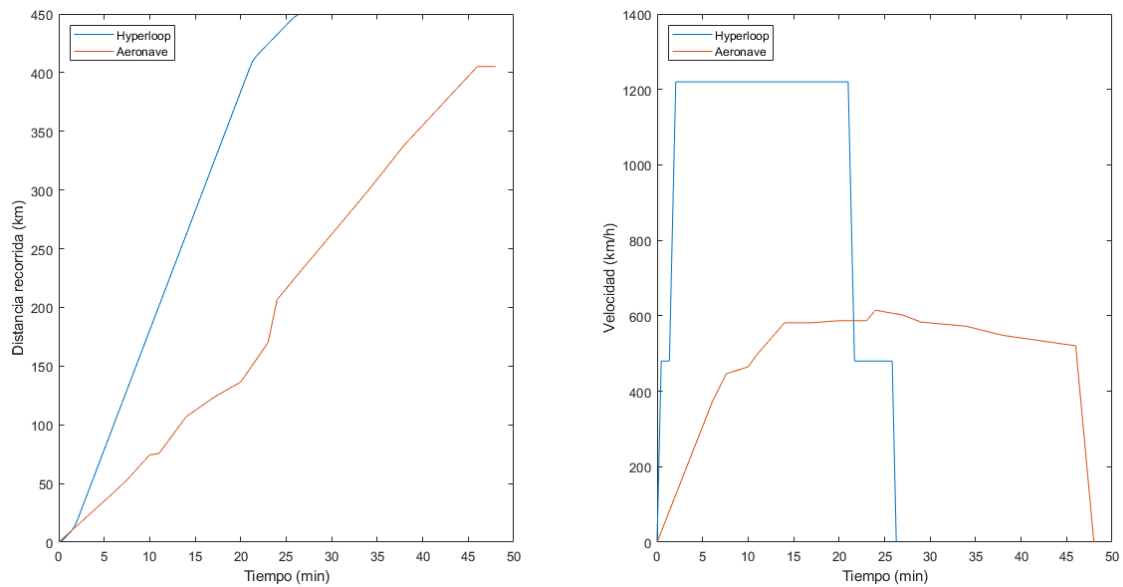


Fig. 3.16 Gráficas de la distancia recorrida y velocidad en función del tiempo (Ámsterdam – París). Fuente propia

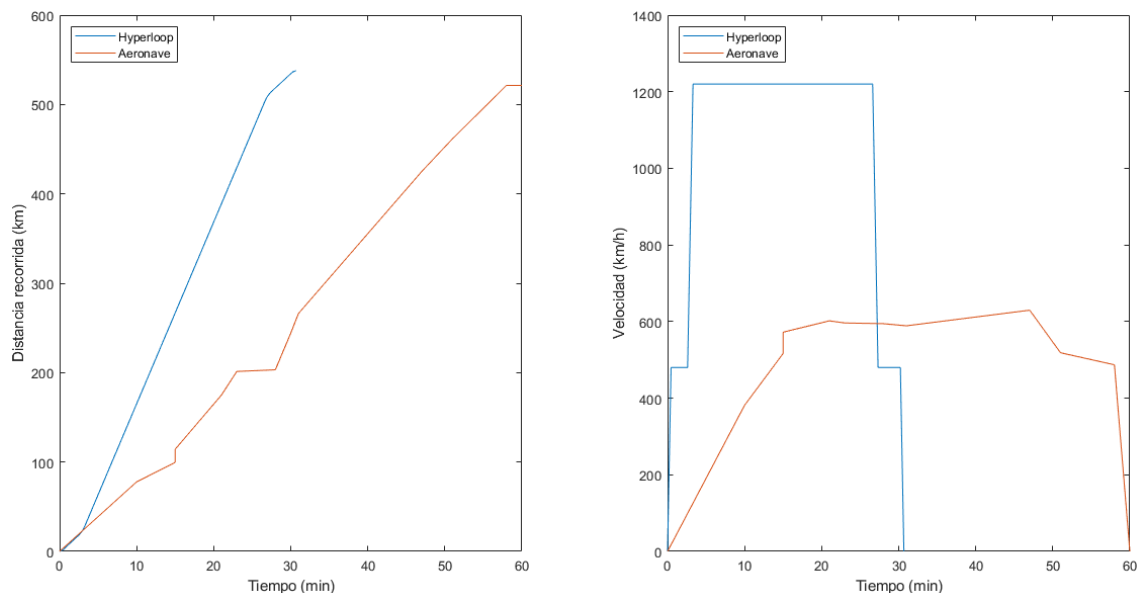


Fig. 3.17 Gráficas de la distancia recorrida y velocidad en función del tiempo (Lisboa – Madrid). Fuente propia

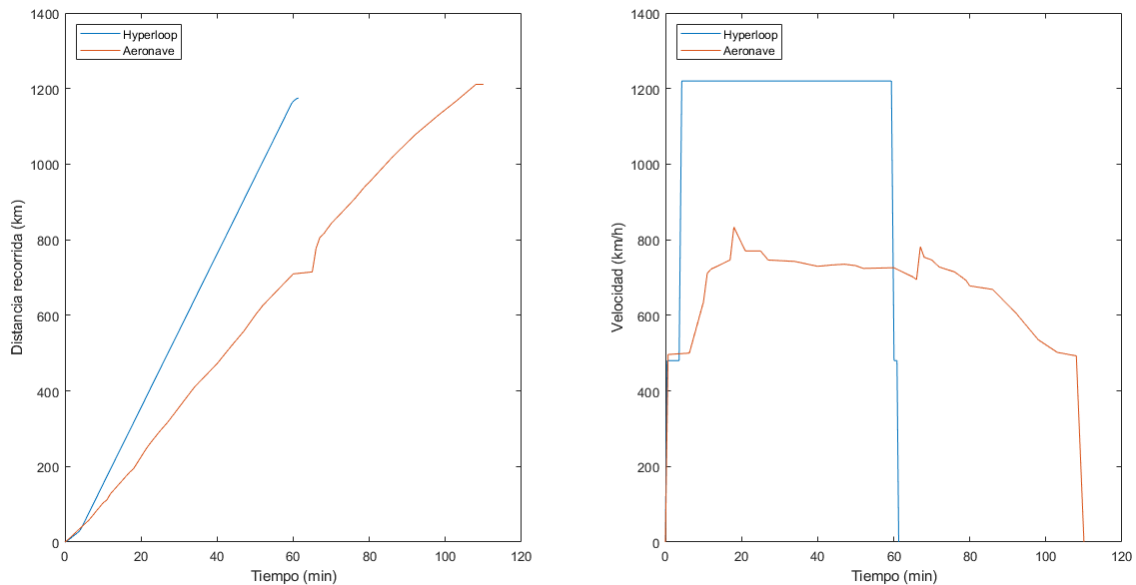


Fig. 3.18 Gráficas de la distancia recorrida y velocidad en función del tiempo (París – Roma). Fuente propia

El comportamiento de las curvas de estas rutas es similar, por lo que pueden ser comentadas de manera conjunta.

En primer lugar, en las gráficas de la izquierda, se observa que la pendiente de la curva azul es mayor que la roja, lo que significa que su velocidad también. Asimismo, no se aprecia ningún patrón sobre la distancia recorrida; dependiendo de la elevación del terreno o de la presencia de áreas urbanas, la ruta en Hyperloop se desvía ligeramente, lo que provoca un aumento en la distancia recorrida. Por otra parte, dependiendo de las aerovías en cada zona, la ruta en avión es más o menos directa, afectando así a su longitud total. Con lo cual, depende de estos factores que una de las dos rutas sea más extensa que la otra.

Los trayectos en Hyperloop son más rápidos que en avión. La diferencia de tiempo entre ambos medios varía en función de dos factores: de los desvíos que el Hyperloop haya tenido que hacer por las razones anteriormente mencionadas y de la distancia que deba recorrer en la ciudad de origen/destino a 480 km/h.

En el caso de la ruta París – Roma, hay prácticamente 50 minutos de diferencia entre el Hyperloop y el avión, una diferencia más que considerable.

A continuación, se muestran las gráficas de la ruta Madrid – Roma; la más particular de todas, ya que es la única en la que ha sido necesario reducir la velocidad hasta los 480 km/h en mitad del trayecto.

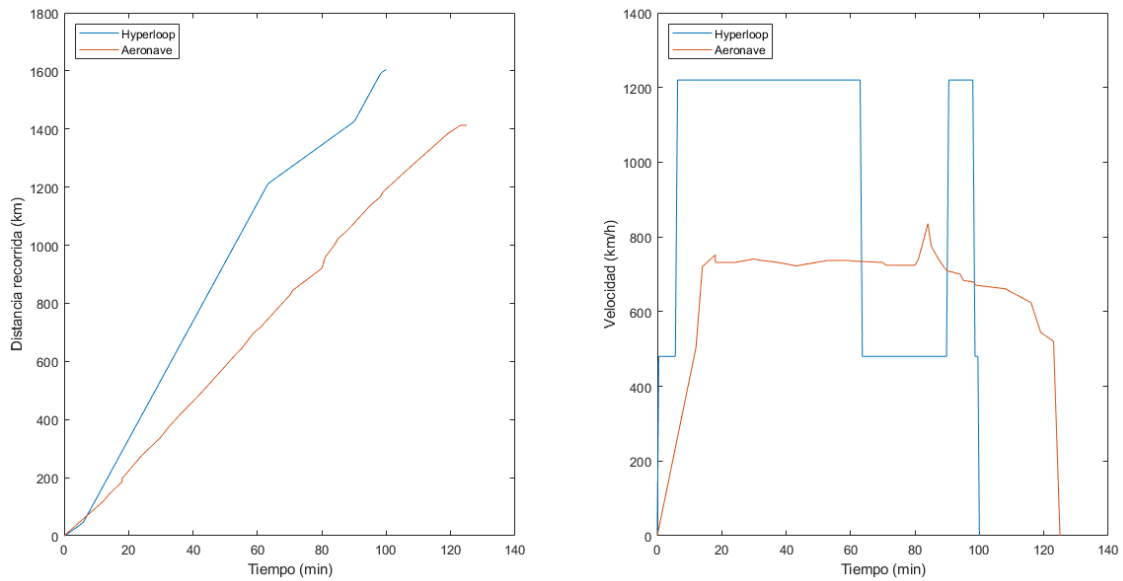


Fig. 3.19 Gráficas de la distancia recorrida y velocidad en función del tiempo (Madrid – Roma). Fuente propia

De nuevo, el pico que se observa en la curva de velocidad de la aeronave puede ser consecuencia de un cambio en la velocidad o dirección del viento (o ambos).

A pesar de la disminución de la velocidad durante más de 25 minutos, la ruta en Hyperloop es 25 minutos más rápida que en avión.

Con lo cual, la principal conclusión que se puede extraer de estas gráficas es que, pese a las pequeñas desviaciones y disminuciones de velocidad que pueda haber en el Hyperloop, las rutas en éste son siempre más rápidas que en aeronave. Si además se considera el tiempo de embarque, desembarque, rodadura y facturación, la diferencia llegaría a ser de horas.

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE LOS COSTES

Uno de los aspectos más relevantes a la hora de comparar ambos medios de transporte es el coste de cada uno de ellos. Conocerlo y analizarlo con detalle es fundamental para extraer conclusiones.

En este capítulo se encuentra, en primer lugar, la definición de los conceptos financieros básicos que son necesarios para la comprensión del resto de apartados. A continuación, se estudia la inversión inicial del Hyperloop y el coste operativo de los dos sistemas.

4.1. Conceptos financieros básicos

Para que un negocio obtenga beneficios, es necesario que realice una inversión; tanto para construir la infraestructura necesaria, como para adquirir los bienes esenciales. Una vez realizada, las empresas deberán hacerse cargo de los costes operacionales presentes en el día a día.

Así pues, los gastos comerciales se pueden dividir principalmente, en gastos de capital o CAPEX y gastos operativos u OPEX.

El acrónimo CAPEX proviene del inglés, *Capital Expenditure*. Hace referencia a los gastos realizados por la empresa en bienes físicos, que serán beneficiosos para el negocio a largo plazo. Por ejemplo, cuando una empresa compra activos fijos o mejora instalaciones existentes, se trata de gastos de capital.

Por otro lado, OPEX (del inglés; *Operational Expenditure*) se refiere a los gastos que tiene la empresa a diario y que son necesarios para prestar sus servicios, tales como gastos administrativos, alquileres, personal, etc.

Otro concepto relevante es el Coste por Asiento-Kilómetro Ofrecido (CAKO o CASK en inglés). Esta expresión se utiliza en aeronáutica para medir los costes operativos de las aerolíneas. Tal y como su nombre indica, el CAKO refleja los costes generados por la compañía al volar un pasajero durante un kilómetro.

El Coste por Asiento-Kilómetro Ofrecido se obtiene al dividir el coste operativo total de la aerolínea entre los Asientos por Kilómetro Ofrecidos (AKO). Estos son los asientos de un avión que están disponibles para reservar en una determinada ruta.

Sin embargo, es preciso considerar que los aviones no suelen volar al 100% de su capacidad, por lo que es más conveniente estudiar los costes teniendo en cuenta los pasajeros transportados o los RPK (*Revenue Passenger Kilometre*). Este último se obtiene de dividir el coste operacional entre el número de pasajeros por kilómetro transportados.

Para obtener estas medidas, es necesario conocer el *load factor* o factor de llenado; expresado comúnmente en forma de porcentaje.

4.2. Costes del Hyperloop

Llevar a cabo un medio de transporte como el Hyperloop, sustentado por pilares de hormigón, con grandes tubos de acero, cápsulas de pasajeros, placas solares y demás, supone un coste muy elevado. Si bien es de esperar que algunos de sus costes operacionales sean menores que el de las aeronaves (dado que no consume combustible), también es lógico suponer que construir la estructura monumental que éste necesita, conlleva una inversión inicial mucho mayor que la de adquirir aeronaves.

En este apartado se estima tanto el coste de la inversión inicial (CAPEX), como el coste unitario del Hyperloop (OPEX). Además, se ha realizado un breve estudio sobre la amortización del coste inicial.

4.2.1. Inversión inicial

Para analizar el coste de la inversión inicial del Hyperloop se ha seguido el modelo de *Hyperloop Alpha*, realizando las adaptaciones pertinentes. Se ha dividido el coste en los distintos subsistemas que lo forman y los resultados se recogen en la Tabla 4.2.

Cápsulas: Únicamente se ha analizado la configuración de pasajeros.

Teniendo en cuenta el precio de todos sus elementos, el coste de cada cápsula es de 1.242.000 €. Si se desea consultar el precio de cada elemento que compone la cápsula, véase la Tabla D.1 del Anexo D.

Para conocer el coste total de las cápsulas, es indispensable saber cuántas son necesarias en toda la red del Hyperloop. Es evidente que el número de cápsulas dependerá totalmente de la demanda, por lo que, a priori, es complicado estimar una cantidad determinada. Por ello, se han asumido las mismas cápsulas que en *Hyperloop Alpha*; 40 por ruta. Esto implica un total de 200 cápsulas para toda la red de transporte. El coste de todas las cápsulas será de 248 millones de euros.

Estructura principal:

El coste del tubo, los pilares, las bombas de vacío y las estaciones supone aproximadamente el 70% del presupuesto total del sistema. El coste de estos elementos en *Hyperloop Alpha* es de 4.977 millones de euros.

Para calcularlo en nuestro sistema, se han extraído de *Hyperloop Alpha* los costes unitarios por kilómetro a partir de los datos mostrados en la Tabla D.2 del Anexo D.

Dado que la ruta diseñada por *Space X* y *Tesla Motors* es de unos 1.126 km (ida y vuelta) y en total, el coste del tubo es de 598 millones de euros, se estima un coste de 531.083 € por cada kilómetro de tubo construido.

De la misma manera, sabiendo que en total la ruta cuenta con 17.905 pilares que suponen un coste de 2.346 millones de euros, el coste por pilar será de 131.024 €.

Por otra parte, se indica que cada kilómetro de túnel tiene un coste aproximado de 28.520.000 €.

Con estos datos se ha podido calcular el coste del tubo, pilares y túnel para cada ruta. Los resultados se muestran a continuación.

Tabla 4.1 Coste desglosado de los tubos, pilares y túneles para todas las rutas. Fuente propia

RUTA	CANTIDAD			COSTE (M€)		
	Tubo (km)	Pilares (ud)	Túnel (km)	Tubo	Pilares	Túnel
Barcelona – París	988 x 2	32.933	508	1.049	4.315	14.488
Ámsterdam – París	449 x 2	14.967	27	477	1.961	770
Lisboa – Madrid	538 x 2	17.934	118	571	2.350	3.365
Madrid – Roma	1.604 x 2	53.467	397	1.704	7.005	11.322
París - Roma	1.175 x 2	39.167	335	1.248	5.132	9.554
Suma				5.049	20.763	39.499
TOTAL				65.311		

Por último, se ha analizado el coste de las estaciones (incluyendo las cámaras de descompresión).

En *Hyperloop Alpha*, el coste total de las dos estaciones es de 239.000.000 €, por lo que el coste de cada estación es aproximadamente de 119,6 millones de euros.

En las cinco rutas diseñadas en este proyecto, hay un total de seis estaciones diferentes (Barcelona, París, Ámsterdam, Lisboa, Madrid y Roma), de forma que el coste será de 717,6 millones de euros.

Si se añade el importe de las estaciones al de los tubos, pilares y túneles calculado anteriormente, se obtiene un coste de estructura principal de 66.029 millones de euros.

Sistema de propulsión:

El coste del sistema de propulsión de *Hyperloop Alpha* es de 128.800.000 €. Un 54% de este valor se corresponde con el coste del estator y los materiales de su estructura, un 33%, al de la electrónica y el 13% restante, al almacenamiento de energía para el sistema.

Al no poder estimar un coste unitario para el sistema de propulsión (tal y como se ha hecho para la estructura), se ha considerado 1,2 veces el valor del sistema de propulsión que aparece en *Hyperloop Alpha* para cada una de las rutas, ya que la ruta diseñada en el documento es más corta que la mayoría de las diseñadas en este proyecto.

Con todo, el sistema de propulsión del sistema, supone un coste de 774.000.000 €.

Sistema de energía:

Se ha aproximado el coste de los paneles solares y la electrónica asociada siguiendo el ejemplo de *Hyperloop Alpha*. En ese caso, son necesarios 28.000 CV y se estima que el coste sea de 193,2 millones de euros.

Al igual que en el sistema de propulsión, se ha considerado un coste de 1,2 veces el valor del sistema de energía de *Hyperloop Alpha* para cada una de las rutas. Esto supone, en total, un importe de 1.159 millones de euros.

Permisos y terrenos:

Finalmente, se encuentra el coste de permisos de construcción y terrenos. En *Hyperloop Alpha*, es de 1.000 millones de dólares. En el proyecto se ha descartado este coste ya que los terrenos tienen una vida útil indefinida, es decir, no se deprecian y, con lo cual, podría recuperarse la inversión por completo en un futuro.

Tabla 4.2 Coste de inversión inicial de la red del Hyperloop. Fuente propia

Componente	Coste (M€)
Cápsulas	248
Estructura principal	66.029
Sistema de propulsión	774
Sistema de energía	1.159
Total	68.210

Construir toda la red de Hyperloop diseñada supondría un importe de 68.210 millones de euros; una cantidad más que considerable. A pesar de que pueda

parecer una cifra descabellada, cabe tener en cuenta que se trata de cinco rutas, seis estaciones y un total de 4.754 km.

4.2.2. Amortización de la inversión inicial

Una vez conocidos los costes de la infraestructura del Hyperloop y, antes de estudiar sus costes de operación, es necesario analizar la amortización del sistema. Se considera que la inversión inicial se pagará anualmente y, por lo tanto, ese coste se debe tener en cuenta en los costes diarios. De hecho, supondrá la mayor parte de los costes por pasajero.

Dado que los diferentes componentes del sistema se depreciarán con el tiempo, es imprescindible conocer su vida útil. Para ello, se han consultado las tablas de amortización del Boletín Oficial del Estado.

Las construcciones, tales como el tubo, los pilares, los túneles y las estaciones, tienen una vida útil de 40 años. Para las cápsulas, se ha considerado una vida útil de 20 años, igual que la de las aeronaves. Se ha asumido la duración de un sistema de tracción para el sistema de propulsión (25 años) y, finalmente, la vida útil del sistema de energía considerada es de 40 años (ya que la de los sistemas de distribución de energía, según el BOE, es de 40 años).

Conociendo el coste de cada uno de los elementos del Hyperloop y su vida útil, se ha obtenido el coste que supondría al año la inversión inicial para cada una de las rutas. Este gasto se ha añadido al coste operacional en el siguiente apartado.

A continuación, se muestran los costes divididos por ruta y componente, así como su coste anual.

Tabla 4.3 Coste de la inversión inicial del Hyperloop por ruta. Fuente propia

			Costes/ruta (M€)				
		Vida útil (años)	Barcelona París	Ámsterdam París	Lisboa Madrid	Madrid Roma	París Roma
INVERSIÓN INICIAL	Cápsulas	20	50	50	50	50	50
	Estructura	40	19.853	3.208	6.287	20.032	15.934
	Propulsión	25	155	155	155	155	155
	Energía	40	232	232	232	232	232
	Estaciones*	40	144	144	144	144	144
		CAPEX	20.432	3.788	6.866	20.611	16.514

*En total se necesitarán seis estaciones, el coste de éstas se ha dividido entre las cinco rutas.

Tabla 4.4 Coste anual de la inversión inicial dividido en rutas. Fuente propia

	CAPEX (M€)	Coste anual (M€)
Barcelona – París	20.432	514
París – Ámsterdam	3.788	98
Lisboa – Madrid	6.866	175
Madrid – Roma	20.611	519
París – Roma	16.514	416

4.2.3. Coste operacional

La prestación de los servicios de transporte conlleva, principalmente, dos tipos de costes: los relacionados con el mantenimiento de la infraestructura y los relativos a la provisión de servicios.

En el coste diario de operación que tendrá el Hyperloop se ha incluido el mantenimiento, el personal y el *marketing*. Al utilizar energía generada por sus propias placas solares, no se debe considerar el coste del consumo de energía ni de combustible.

En el caso de los trenes de alta velocidad, los costes de mantenimiento no suelen superar el 5% de la inversión inicial, por lo que también se ha asumido esta cifra para el Hyperloop. Además, de los informes anuales de Ryanair y EasyJet, se extrae que el coste de mantenimiento se sitúa entre el 3% y 6% del coste operativo total.

Se ha considerado que trabajarán veinte personas en cada ruta (incluye tanto el personal de las estaciones como los diseñadores de rutas, informáticos, etc.) y que cada uno de ellos tendrá un sueldo de 40.000 € netos anuales. Se ha asumido que el 34% de su sueldo bruto se destinará a la Seguridad Social.

Por otra parte, se ha considerado que el *marketing* representará el 4% de la inversión inicial. Se ha escogido este valor ya que se ha analizado el porcentaje que representa el *marketing* sobre el coste operativo total de varias aerolíneas y el 4% es un importe intermedio.

Finalmente, la mayor parte de los costes diarios estarán compuestos, tal y como se ha indicado anteriormente, por la amortización de la inversión inicial.

Estos son los importes de operación principales. El resto (como el servicio de limpieza, por ejemplo) suponen un porcentaje muy bajo y prácticamente no afectarán a los resultados.

Para calcular el coste operacional del Hyperloop y poder compararlo con el de las compañías aéreas, se ha estimado conveniente emplear costes unitarios, por ello, los resultados se dan en costes por pasajero y costes por Pasajero-

Kilómetro Transportado (en inglés, Revenue Passenger-Kilometre). De nuevo, es necesario conocer la capacidad de cada ruta. Para ello, se ha asumido que el nuevo modo de transporte generará la demanda que tienen actualmente las mismas rutas en el sector aéreo.

Para obtener estos datos, se ha empleado la herramienta de IATA, *SRS Analyser* y se ha hecho una serie de consideraciones. En primer lugar, que en cada vuelo hay capacidad para transportar hasta 180 pasajeros (capacidad típica del Airbus A320) y, en segundo lugar, que el factor de llenado es del 92%. Se ha escogido este valor porque el *load factor* de la mayoría de aerolíneas de bajo coste se sitúa entre el 91% y 96%.

Con todo, se ha obtenido el coste por pasajero para cada una de las rutas diseñadas. Los resultados se muestran a continuación.

Tabla 4.5 Desglose del coste operacional anual del Hyperloop. Fuente propia

		Barcelona París	París Ámsterdam	Lisboa Madrid	Madrid Roma	París Roma
Coste operacional (M€)	Amortización inversión	514	98	175	519	416
	Mantenimiento	26	5	9	26	21
	Personal	1	1	1	1	1
	Marketing	21	4	7	21	17
	Total	562	108	192	567	455

Tabla 4.6 Coste por pasajero transportado para el Hyperloop. Fuente propia

	Barcelona París	París Ámsterdam	Lisboa Madrid	Madrid Roma	París Roma
PAX anuales	2.748.463	1.563.595	1.917.302	1.711.973	2.405.671
Coste/PAX (€)	204,38	69,18	97,43	330,97	189,12
Coste/RPK (€)	0,21	0,15	0,18	0,21	0,16

Como se puede observar, el coste de la infraestructura es muy elevado, sobre todo en las rutas más largas. Esto implica que, para que el Hyperloop pueda ofrecer billetes a precios razonables y competitivos, la demanda debería ser mucho mayor.

Se ha elaborado una aproximación para obtener el precio de venta de cada billete. Para ello se ha considerado que se desea obtener un 30% de beneficios sobre los costes calculados. Con esto, se obtienen unos precios de venta al público un tanto elevados para la mayoría de rutas.

Tabla 4.7 Precio de venta aproximado de los billetes del Hyperloop. Fuente propia

	Precio del billete (€)
Barcelona – París	265,70
París – Ámsterdam	89,93
Lisboa – Madrid	126,66
Madrid – Roma	430,26
París – Roma	245,85

Conociendo los costes y los ingresos, se han podido obtener los beneficios anuales para cada trayecto.

Tabla 4.8 Beneficios anuales del Hyperloop. Fuente propia

	Barcelona París	París Ámsterdam	Lisboa Madrid	Madrid Roma	París Roma
Costes anuales (M€)	562	108	192	567	455
Ingresos anuales (M€)	730	141	250	737	591
Beneficios anuales (M€)	169	32	58	170	136
	565				

4.3. Costes del sector aeronáutico

Son muchos los costes a los que las empresas del sector aéreo deben hacer frente. Por una parte, deben amortizar los costes de la inversión inicial; las infraestructuras y la compra de aviones en el caso de las aerolíneas. Por otro lado, también deben hacerse cargo de los costes diarios de operación.

Dado que los aeropuertos que conectan las rutas diseñadas ya están contruidos y operativos, en este estudio no se ha considerado el coste de la infraestructura ni la adquisición de aeronaves (que se correspondería con el CAPEX). Sólo se ha analizado el coste operacional de las compañías aéreas.

4.3.1. Coste operacional

Tal y como se ha mencionado anteriormente, uno de los parámetros clave en la competición entre aerolíneas es el coste unitario ligado a los gastos operativos. Tener un coste unitario bajo es una ventaja que permite a las compañías ser rentables a pesar de ofrecer tarifas bajas.

El coste de operación del sector aéreo varía, básicamente, en función de dos factores. En primer lugar, depende de la distancia media recorrida por la aerolínea (*Average Stage Length*) y, en segundo, de si se trata de una compañía de bajo coste (*Low-Cost Carriers* o LCCs) o de una regular (también conocidas como *Legacy Carriers* o *Full Service Carriers*).

Si bien es cierto que existe una clara diferencia entre los servicios prestados, cada vez son más los clientes que optan por las compañías de bajo coste.

Las FSC (*Full Service Carriers*) siguen el modelo *hub and spoke*. Este modelo consiste en concentrar el tráfico en aeropuertos de gran capacidad (*hubs*) y estos enlazan con los de menor tamaño (*spokes*). Estas compañías incluyen en el precio del billete el transporte de maletas o comidas durante el vuelo, entre otros.

En cambio, las aerolíneas de bajo coste, se basan en servicios punto a punto y ofrecen billetes básicos con opción a contratar servicios extra si el cliente lo desea. Este tipo de aerolíneas ha configurado sus aviones de la manera más provechosa posible y su flota suele estar compuesta por aviones del mismo tipo. De esta forma el mantenimiento es eficiente y permite ahorrar gastos.

Para hacer que la comparación con el Hyperloop sea lo más realista posible, se ha estudiado el coste de aerolíneas LCC y FSC.

Por otra parte, el hecho de que el coste unitario de las aerolíneas varíe en función de la media de kilómetros recorridos, dificulta la comparación con otras aerolíneas.

Generalmente, el coste del asiento por kilómetro decrece a la vez que la longitud media del trayecto aumenta, ya que los costes fijos se amortizan y los variables, como el combustible, se consumen de manera más eficiente en vuelos largos.

En la imagen 4.2 se representan los costes unitarios de aproximadamente 30 aerolíneas (LCCs y *Legacies*) en función de la longitud media de los trayectos. Este gráfico, extraído de la web de CAPA; *Centre for Aviation*¹⁸, se elaboró con los datos del 2012, por lo que los resultados pueden variar con los obtenidos en 2019. Además, se debe tener en cuenta que el CAKO se representa en centavos (USD).

¹⁸ Forma parte de *Aviation Week Network*. Es una fuente fiable de inteligencia de mercados en la industria de la aviación.

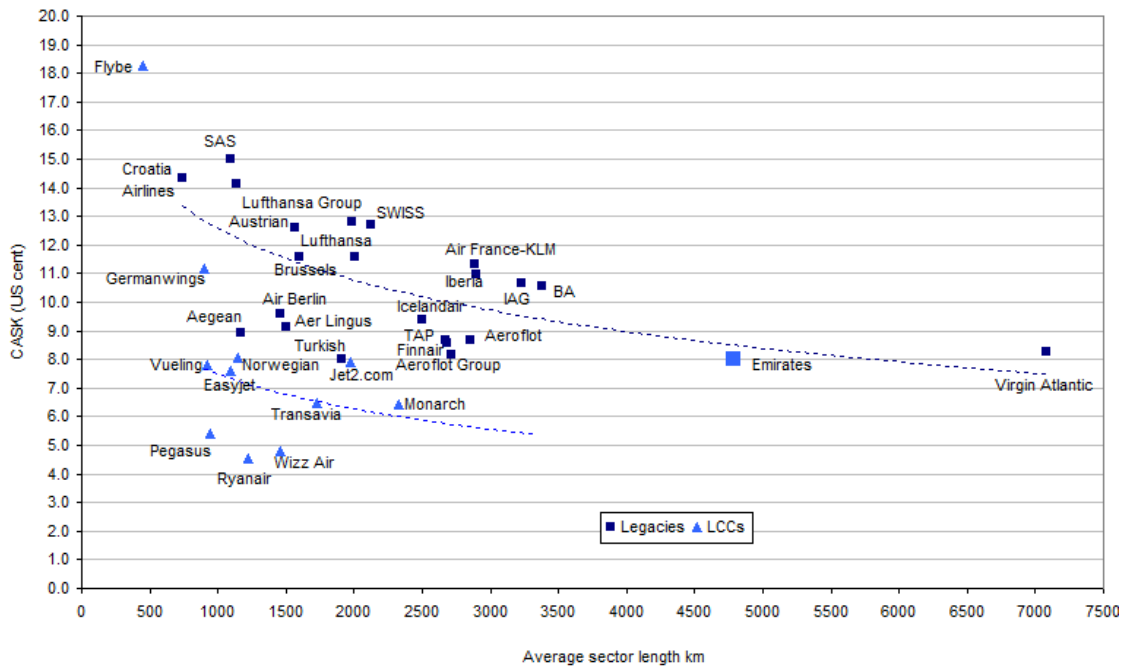


Fig. 4.1 Coste por AKO (en centésimas de USD) en función de la longitud media de los trayectos (en km). Fuente: CAPA, Centre for Aviation

Como se observa, tanto los costes de las aerolíneas *low cost* como las *Legacies*, siguen una regresión no lineal. Conociendo el *Average Stage Length*, el CAKO se puede aproximar con la siguiente expresión:

$$CAKO_1 = CAKO_0 \cdot \sqrt{\frac{ASL_0}{ASL_1}} \quad (4.1)$$

De esta forma, se puede obtener el coste unitario para cada ruta.

Se ha examinado la economía de algunas aerolíneas a partir del informe anual de sus cuentas.

Las compañías que se han escogido son Ryanair y EasyJet como LCC y Lufthansa como *Legacy*. Para obtener un único valor de coste de una aerolínea *Low Cost*, se ha hecho la media entre los valores de Ryanair y EasyJet (ya que la primera tiene el CAKO más bajo de todas).

En primer lugar, Ryanair obtuvo en 2019 un CAKO de 0,038 € para una longitud media de 1.258 km, mientras que el CAKO de EasyJet fue de 0,059 €, con una longitud media de 1.052 km.

Por otra parte, Lufthansa ofreció 359.567 asientos y resultó un coste operativo de 37.124 €, por lo que su CAKO en 2019, fue de 0,103 €.

Los CAKO de estas aerolíneas incluyen los costes de combustible, empleados, *leasing*¹⁹ de las aeronaves, mantenimiento, *marketing*, entre otros.

Hay que tener en cuenta que el precio del combustible es muy variable con el tiempo. Por ello, se ha considerado la posibilidad de sustituir el coste de *fuel* que aparece en los informes por el valor que tendría en la actualidad, pero si se analiza su evolución (Figura 4.2), se observa que el precio por galón ha decrecido un 51,2% respecto a marzo del 2019 debido a la crisis sanitaria actual. Por ello, se ha considerado que los resultados no serían realistas y se ha descartado esta opción.

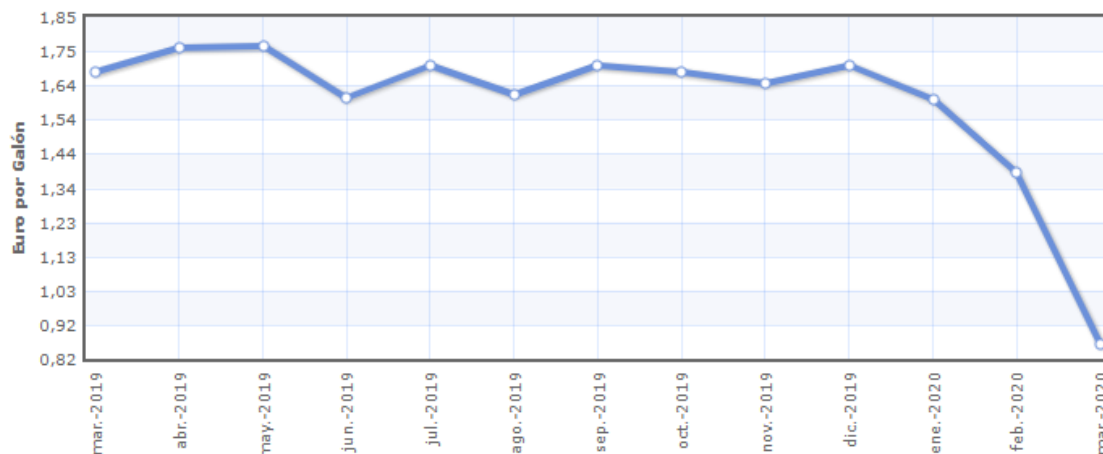


Fig. 4.2 Evolución del precio del combustible (marzo 2019 - marzo 2020).

Fuente: *US Energy Information Administration*

Utilizando la expresión 4.1, conociendo los costes unitarios de Ryanair, EasyJet y Lufthansa y las longitudes medias de vuelo, se han obtenido los siguientes CAKO para las rutas diseñadas.

Tabla 4.9 Coste por Asiento-Kilómetro Ofrecidos para cada ruta. Fuente propia

	ASL* (km)	CAKO Ryanair (cent. €)	CAKO EasyJet (cent. €)	CAKO Lufthansa (cent. €)
Barcelona – París	943	4,39	9,50	13,42
París – Ámsterdam	406	6,69	6,23	20,45
Lisboa – Madrid	522	5,90	8,38	18,03
Madrid – Roma	1.413	3,59	5,09	10,96
París – Roma	1.211	3,87	5,50	11,84

*Average Stage Length. Extraído de la longitud del trayecto de SkyVector.

¹⁹ Servicio que permite a la empresa disponer de bienes de equipo (aeronaves) en régimen de alquiler con opción a compra.

El coste unitario por pasajero de una compañía LCC utilizado más adelante en los cálculos se corresponde con la media de los valores obtenidos con los datos de Ryanair y EasyJet, tal y como se ha mencionado anteriormente. El factor de llenado considerado es del 92%, valor intermedio de los *load factors* de ambas compañías.

El factor de llenado de Lufthansa en 2019 fue del 82,5%.

Con estos valores y los que aparecen en la Tabla 4.9, se ha calculado el coste por pasajero transportado y por pasajero-kilómetro. De esta forma, se pueden comparar con los obtenidos para el Hyperloop.

Tabla 4.10 Costes por pasajero transportado para cada ruta. Fuente propia

		Barcelona París	París Ámsterdam	Lisboa Madrid	Madrid Roma	París Roma
LCC	Coste/PAX (€)	54,43	35,72	40,50	66,63	61,68
	Coste/RPK (€)	0,06	0,09	0,08	0,05	0,05
FSC	Coste/PAX (€)	153,36	100,63	114,10	187,72	173,79
	Coste/RPK (€)	0,16	0,25	0,22	0,13	0,14

Se puede apreciar que, tal y como se ha comentado anteriormente, a medida que la longitud de la ruta es mayor, el coste por RPK disminuye (tanto para una LCC como para una FSC).

4.4. Comparación

Una vez analizados los costes del Hyperloop y de las compañías aéreas, se observa que las aerolíneas *low cost* tienen un coste por pasajero mucho menor que las FSC o el Hyperloop. Además, en la mayoría de las rutas, el coste unitario del Hyperloop está incluso por encima de las *Legacies*. Esto se debe a la elevada inversión inicial necesaria para construir la infraestructura.

El hecho de tener un coste unitario mayor que el de las aerolíneas, supone que los billetes del Hyperloop sean, en la mayoría de casos, más elevados que el resto. Llegando incluso a ser desorbitados.

En la siguiente tabla se muestra, a modo de resumen, la duración de cada trayecto y los precios de venta de los billetes.

Tabla 4.11 Precio del billete y duración de los trayectos, por modo de transporte.
Fuente propia

			Barcelona París	Ámsterdam París	Lisboa Madrid	Madrid Roma	París Roma
Duración trayecto	Hyperloop		1 h 9 min	26 min	30 min	1h 40 min	1h 1 min
	Aeronave*		2 h 1 min	1 h 10 min	1 h 21 min	2 h 29 min	2 h 12 min
Precio billete (€)	Hyperloop		265,70	89,93	126,66	430,26	245,85
	Aeronave	LCC	60	60	27	35	57
		FSC	65	103	38	49	69

* La duración del trayecto incluye los tiempos de rodaje.

El coste del billete para las aeronaves es difícil de determinar, ya que el precio de venta varía según la curva de llenado del avión. Por lo que, dependiendo del día en que se consulte y de la fecha del vuelo, los precios pueden cambiar drásticamente.

Se considera tan importante comparar los precios de venta al público como la duración de cada trayecto. Como se puede observar, en la mayoría de casos, los billetes del Hyperloop tienen un coste desmesuradamente por encima del de las aerolíneas. En cambio, en la ruta Ámsterdam – París, el precio está entre una aerolínea de bajo coste y una *Legacy*. Esto se debe a que, además de ser la ruta más corta, es también la que menos túnel necesita.

A pesar de que los clientes que escogieran el innovador medio de transporte estarían ahorrando entre 44 y 71 minutos, el precio a pagar sería mucho mayor que el de viajar en avión.

A modo de resumen, se ha elaborado una tabla dónde aparecen los resultados más relevantes de los apartados anteriores.

Tabla 4.12 Parámetros principales de cada ruta para el Hyperloop y la aeronave. Fuente propia

	Ruta	Longitud (km)	Duración	Capacidad (PAX/año)	CAPEX (M€)	Coste/PAX (€)	Coste operacional anual (M€)
Hyperloop	Barcelona París	988	1 h 9 min	2.748.463	20.432	204,38	562
	Ámsterdam París	449	26 min	1.563.595	3.788	69,18	108
	Lisboa Madrid	538	30 min	1.971.302	6.866	97,43	192
	Madrid Roma	1.604	1h 40 min	1.711.973	20.611	330,97	567
	París Roma	1.175	1h 1 min	2.405.671	16.514	189,12	455
Aeronave	Barcelona París	943	2 h 1 min	2.748.463	-	103,90	286
	Ámsterdam París	406	1 h 10 min	1.563.595	-	68,18	107
	Lisboa Madrid	522	1 h 21 min	1.971.302	-	77,30	152
	Madrid Roma	1.413	2 h 29 min	1.711.973	-	127,18	218
	París Roma	1.211	2 h 12 min	2.405.671	-	117,74	283

La longitud de las rutas en avión proviene del *Navigation Log* extraído de *SkyVector*. La capacidad es la misma para ambos medios de transporte ya que, como se ha mencionado, se considera que el Hyperloop estimularía la misma demanda que las aeronaves.

Por otra parte, para tener un solo valor de coste por pasajero que comparar con el Hyperloop, se ha hecho la media entre el valor de las *low cost* y Lufthansa. Con esto y con la capacidad, se ha calculado el coste operacional anual.

Las diferentes aproximaciones que se han realizado, hacen que los resultados no sean del todo realistas, pues en realidad la capacidad de ambos medios estará ligada totalmente a la demanda y, en consecuencia, sus costes.

CAPÍTULO 5. COMPARATIVA

Antes de extraer conclusiones acerca del Hyperloop frente al sector aeronáutico, hay una serie de aspectos que aún deben analizarse. Por ello, en este último capítulo se estudia la seguridad, la contaminación y se presentan las ventajas y desventajas de ambos medios de transporte.

5.1. Seguridad y fiabilidad

La seguridad de los clientes es uno de los factores más importantes que los diseñadores de un medio de transporte deben considerar.

En la actualidad, viajar por carretera resulta el modo más peligroso. Según datos de la Organización Mundial de la Salud, alrededor de 1,3 millones de personas pierden la vida en el asfalto cada año.

En el extremo contrario se sitúa el avión, que tan sólo registra un accidente grave por cada 2,4 millones de vuelos. A día de hoy es considerado el medio de transporte más seguro del mundo, pero, ¿será el Hyperloop más seguro todavía?

A pesar de que no hay datos experimentales sobre la seguridad de este último (dado que aún no se ha implementado), el equipo de *Space X* y *Tesla Motors* asegura haberla tenido en cuenta desde el comienzo.

El hecho de que la cápsula circule en un entorno aislado y totalmente controlado permite que no sea necesario considerar las condiciones meteorológicas; el sistema es inmune al viento, al hielo, a la lluvia y a la niebla. La estructura estaría preparada para soportar fuertes rachas de viento, lluvias, etc.

Cabe destacar que, en aviación, la causa más común en los accidentes es el error humano y, tal y como se aprecia en la Figura 5.1, alrededor del 40% de los accidentes aéreos entre 1967 y 2010, tuvieron su origen en un fenómeno meteorológico.

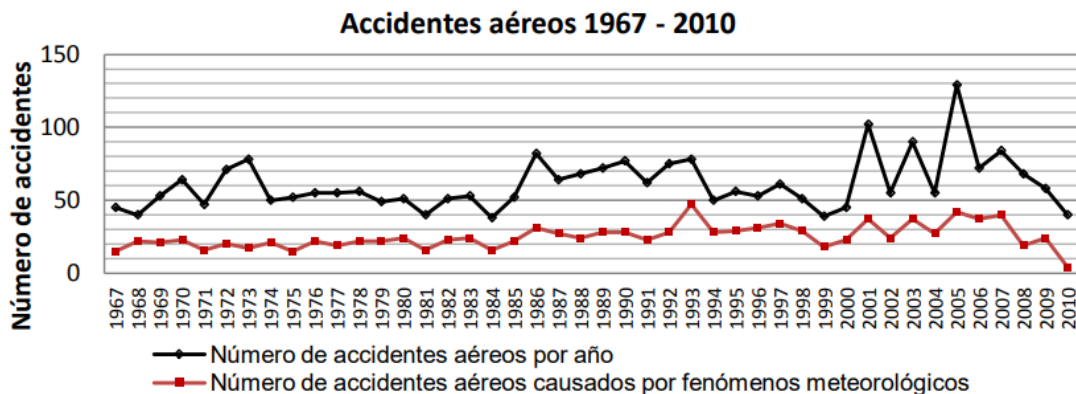


Fig. 5.1 Gráfica comparativa entre el número de accidentes aéreos totales y los causados por meteorología adversa entre 1967 y 2010. Fuente [WRF simulation of the atmospheric conditions in some aircraft accidents]

Teniendo en cuenta que el Hyperloop no requiere conductor, los accidentes por factor humano se reducirían considerablemente.

A continuación, se analizan algunas de las situaciones de emergencia que los dos medios podrían encontrarse.

Dado que la mayoría de rutas en Hyperloop tienen una duración reducida, en caso de una emergencia que permitiese al sistema seguir circulando, la cápsula avanzaría hasta llegar al destino, dónde estarían los servicios de emergencia esperando.

En el caso de los aviones, la ruta debería ser redirigida, al igual que la del resto aeronaves que volasen alrededor, las pistas despejadas, el avión debería aterrizar, avanzar hasta el puesto de estacionamiento y finalmente, abrir sus puertas.

Si por algún motivo hubiera un corte de energía durante el trayecto en Hyperloop, los aceleradores lineales serían capaces de transportar la cápsula hasta el destino con la energía almacenada y, gracias a las baterías redundantes que se habrán instalado, el sistema de soporte vital seguiría funcionando sin problemas. Además, todas las cápsulas dispondrán de un sistema de frenado de emergencia.

Una situación similar en una aeronave sería la insuficiencia de combustible o la pérdida de un motor. En ambos casos sería necesario realizar un aterrizaje de emergencia y de nuevo, redirigir al resto de aviones, despejar la pista de aterrizaje, etc.

Otra emergencia que podría darse es la despresurización de la cabina. Los diseñadores del Hyperloop aseguran que, si se detectase una pequeña fuga, el sistema de control ambiental a bordo sería capaz de mantener la presión de la cápsula utilizando una reserva de aire para periodos cortos, hasta llegar al destino. También habría máscaras de oxígeno instaladas para los pasajeros.

Si se diese una despresurización a gran escala, el resto de cápsulas en el tubo frenarían con el freno de emergencia y el tubo se presurizaría por completo. Además, se instalarán salidas de emergencia en puntos clave del recorrido.

Si la despresurización ocurriese en la cabina de un avión, pasajeros y tripulantes también contarían con máscaras de oxígeno.

No todas las situaciones de emergencia pueden darse en ambos medios; por ejemplo, en el tubo del Hyperloop podría quedar una cápsula varada. Si de alguna manera esto ocurriese, las cápsulas que fueran por delante, llegarían a su destino sin alteraciones, mientras que, las que la siguieran por detrás, recibirían instrucciones automáticas para utilizar el frenado de emergencia y, una vez que estuviesen todas detenidas, se auto conducirían a un lugar seguro usando pequeños motores eléctricos a bordo para impulsar las ruedas desplegadas. Una vez que se reparase/retirase la cápsula varada, el resto volvería a circular con normalidad.

Por otra parte, la ruta diseñada en *Hyperloop Alpha* se encuentra en California; lugar bastante habituado a los terremotos. Por ello, sus diseñadores tuvieron en mente en todo momento que la estructura debía ser suficientemente flexible como para resistir a los seísmos. Si hubiera un fuerte terremoto, el frenado de emergencia de las cápsulas se activaría de manera automática.

Finalmente, en cuanto al nivel de seguridad de las estaciones, se espera que sea tan alto como el de los aeropuertos. A pesar de ello, dado que se busca un flujo de pasajeros dinámico, los controles también deberán serlo, de forma que, al no ser tan exhaustivos, quizá sean menos eficaces.

5.2. Impacto medioambiental

Desde el siglo XVIII hasta la actualidad, la temperatura media global del planeta ha aumentado 1,1 °C y, en consecuencia, la tasa de aumento del nivel del mar ha ascendido a 5 mm al año. Todo ello, es el resultado de la emisión de gases nocivos por parte del ser humano. Estos gases incrementan la capacidad de la atmósfera para retener calor, dando lugar al calentamiento global.

El cambio climático no sólo afecta al planeta, sino que también tiene impactos económicos y sociales como el incremento de sequías, fenómenos meteorológicos extremos, incendios, etc.

Según datos del Parlamento Europeo, en la UE, alrededor del 27% de las emisiones de gases de efecto invernadero tienen su origen en la quema de combustible para los transportes. De ese 27%, tan sólo el 3,5% pertenece a la aviación.

A pesar de representar menos del 5%, cabe considerar que la emisión de gases nocivos por parte de este sector, ha aumentado casi un 130% en dos décadas debido al crecimiento del tráfico aéreo.

Desde hace años las aerolíneas buscan constantemente la manera de reducir el consumo de combustible, no sólo para contribuir en menor medida en el deterioro del planeta, sino para reducir sus propios gastos.

Los fabricantes de aeronaves y organizaciones como IATA, proporcionan a las compañías recomendaciones para obtener un consumo eficiente. Además, las nuevas generaciones de aviones han conseguido reducir hasta un 15% el CO₂ emitido.

También, la UE está trabajando junto a la OACI para implementar una medida global que obligue a las compañías aéreas a compensar sus emisiones mediante la inversión en proyectos verdes.

Gracias a los avances tecnológicos, cada vez es más factible que los aviones sean eléctricos en un futuro. Actualmente hay varios prototipos en desarrollo.

Por otro lado, el Hyperloop no utiliza combustible para impulsar sus cápsulas, sino que requiere energía eléctrica. La producción de electricidad es, a día de hoy, la mayor fuente de gases nocivos del mundo, pero, este medio utilizaría la electricidad producida por las placas solares, por lo que su contribución al calentamiento global sería muy reducida.

5.3. Ventajas del Hyperloop frente a las aeronaves

A lo largo de todo el proyecto se han podido observar las distintas ventajas que presenta el Hyperloop en comparación con el sector aeronáutico; la primera y más evidente es su rapidez. Este medio de transporte será capaz de transportar pasajeros a una velocidad transónica de 1.220 km/h, mientras que una aeronave convencional para distancias cortas y/o medias alcanza una velocidad máxima que ronda los 900 km/h.

Los pasajeros no sólo ahorrarían tiempo durante el trayecto, sino que también lo harían en el proceso previo al embarque. Para viajar en avión se recomienda llegar al aeropuerto dos horas antes de la salida del vuelo con tal de no correr el riesgo de perderlo, teniendo en cuenta los largos tiempo de espera en los controles de seguridad y el embarque. En cambio, se pretende que estos procesos sean más ágiles en el Hyperloop.

Por otra parte, a diferencia del avión, se trata de un medio de transporte respetuoso con el medio ambiente. Gracias a las placas solares instaladas en la parte superior del tubo, el Hyperloop generará energía suficiente para funcionar incluso de noche y durante largos periodos de tiempo nublado.

Como se aprecia en la Figura 5.2, el Hyperloop requiere menor cantidad de energía, mientras que la aeronave es el medio que más necesita.

Si bien es cierto que será un sistema ruidoso, el tubo de acero contendrá parte del sonido. En cambio, en los entornos aeroportuarios no es posible contenerlo de ningún modo.

Además, los diseñadores de *Hyperloop Alpha*, afirman que será un medio más seguro que el avión. A pesar de que por el momento no haya pruebas que lo confirmen, considerando que muchos de los accidentes en el sector aéreo se deben a condiciones meteorológicas desfavorables y, que el Hyperloop no se verá afectado por el tipo de meteorología, la probabilidad de accidente quedará notablemente reducida.

Toda aerolínea dispone de un equipo de planificación de rutas. Este equipo, se encarga de diseñar las rutas que se van a operar en función de las circunstancias (pista de despegue disponible, dirección y velocidad del viento, etc.). En el Hyperloop sólo será necesario diseñarlas una primera vez. Después no habrá variaciones y por lo tanto se podrá prescindir de ese equipo.

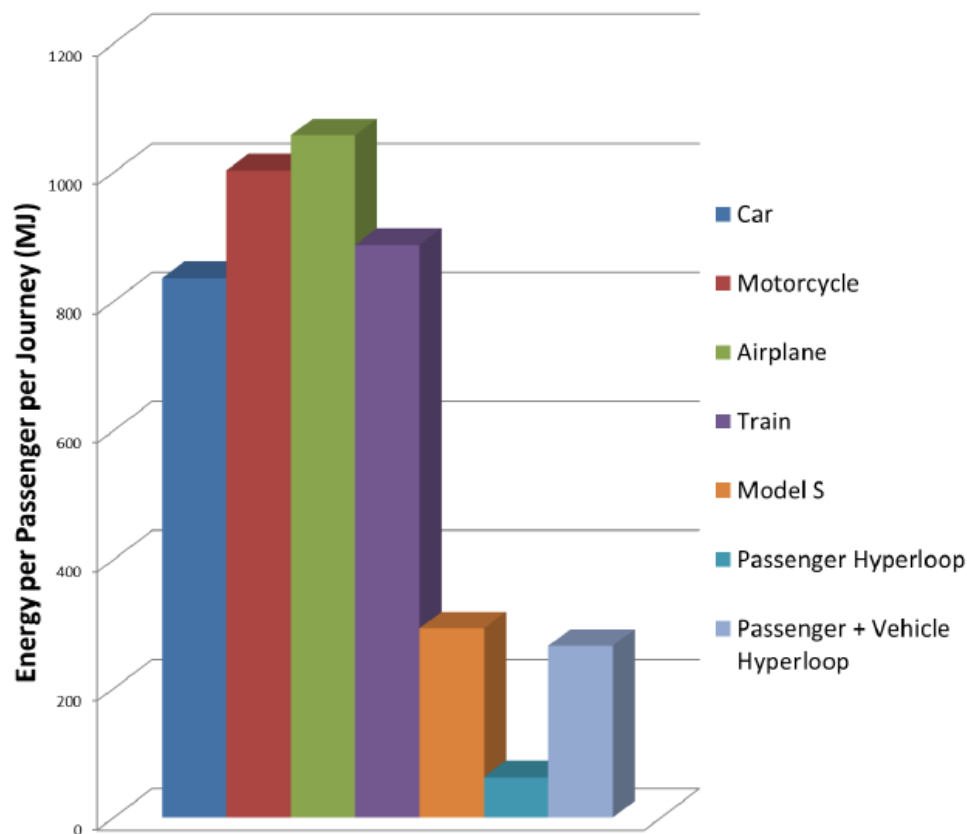


Fig. 5.2 Coste de la energía por pasajero y por medio de transporte.

Fuente: *Hyperloop Alpha*

5.4. Desventajas del Hyperloop frente a las aeronaves

No todas las características del Hyperloop son ventajas; este medio también presenta desventajas si se compara con el sector aeronáutico.

En primer lugar, está muy limitado por las características del terreno: las rutas deben evitar parques naturales, zonas montañosas, recintos aeroportuarios y áreas urbanas. En caso de atravesar zonas urbanas, la velocidad se verá considerablemente reducida, mientras que, si se atraviesan montañas, se deberá construir un túnel.

Además, en un principio el Hyperloop no atravesará el mar. Aunque sería factible desde el punto de vista de la construcción, el coste de inversión sería todavía mayor. Con lo cual, en principio no operará rutas como Londres – Ámsterdam, actualmente muy demandada en el sector aéreo y deberá dar rodeos innecesarios con una aeronave, como en la ruta Madrid – Roma.

A diferencia de los aviones, los pasajeros que viajen en Hyperloop sólo podrán llevar dos maletas con un peso máximo de 50 kg.

Debido a la elevada inversión necesaria para construir el Hyperloop, el coste por pasajero es, en la mayoría de casos, muy superior al de las aeronaves. Por este motivo, los billetes del Hyperloop tendrán un coste mucho mayor que los del avión.

Por otro lado, a pesar de que no contribuya a la contaminación atmosférica, la estructura del Hyperloop supondría un gran impacto visual.

Finalmente, cabe destacar que la seguridad de este medio aún ha sido probada.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

Con el desarrollo de este proyecto se ha pretendido, principalmente, estudiar la viabilidad de implementación del Hyperloop, comparando sus prestaciones con la aviación.

Primero se ha hecho una pequeña contextualización con tal de que se conozca cómo surgió y cuál es la situación actual de este modo de transporte, así como la de sus antecesores y/o similares.

También con la finalidad de conocer más acerca del Hyperloop, se ha dedicado un capítulo a su descripción y principio de funcionamiento, centrándose este último en los sistemas de propulsión, compresión y potencia.

A continuación, se han diseñado diferentes rutas, tanto para el Hyperloop como para las aeronaves. Éstas han sido claves a la hora de comparar las prestaciones y los costes de ambos medios.

A partir de la densidad de tráfico aéreo en Europa y de los datos obtenidos de IATA sobre la capacidad de distintas aerolíneas, se han escogido las rutas Barcelona – París, Ámsterdam – París, Lisboa – Madrid, Madrid – Roma y París – Roma.

Los trayectos en Hyperloop se han creado siguiendo las indicaciones y consideraciones de *Hyperloop Alpha*, utilizando *Google Earth Pro* y aproximando las rutas a pequeños tramos de movimiento rectilíneo uniforme o uniformemente acelerado. Por otra parte, se ha utilizado *SkyVector* para el diseño de las rutas en aeronave y, finalmente, se han elaborado dos gráficas para cada uno de los trayectos. En ellas se representa la distancia y velocidad en función del tiempo para ambos medios de transporte.

Comparando la longitud de las rutas de avión con las del Hyperloop, se observa que las primeras tienen una longitud menor y, a su vez, una mayor duración. De media, una persona ahorraría un 51% de tiempo viajando en Hyperloop. Si además se tiene en cuenta el tiempo de facturación, los controles de seguridad y el embarque y desembarque necesarios para viajar en avión, a ese ahorro se le añadirían dos horas aproximadamente.

Así pues, el Hyperloop permitiría a las personas viajar en tiempos muy reducidos, a pesar de que, en ocasiones, fuera necesario desviar la ruta para evitar ciudades o zonas montañosas.

Después, se ha procedido al análisis de los costes. Para una mejor comprensión del resto de apartados, primero se han introducido algunos conceptos financieros básicos y después, se ha estudiado el coste de inversión, de operación y la amortización del Hyperloop, así como el coste operacional de las aerolíneas.

El coste de los diferentes elementos que componen la infraestructura del Hyperloop se ha extraído de *Hyperloop Alpha*, adaptándolo a las rutas

diseñadas. En total, se ha calculado que sería necesaria una inversión inicial de 68.210 millones de euros para construir la red de transporte propuesta.

Conociendo la vida útil de los distintos elementos que forman la estructura, se ha determinado el coste anual de la amortización de la inversión y, junto al resto de costes operacionales y a la capacidad estimada para cada ruta, se han obtenido los costes por pasajero del Hyperloop.

Por otra parte, se han consultado los informes de cuentas anuales de varias aerolíneas; Ryanair y EasyJet como *Low Cost Carriers* y Lufthansa como *Full Service Carrier* con la finalidad de extraer los costes operacionales. A partir de una aproximación, se han calculado los costes por pasajero para cada ruta, ajustándolo a la *Stage Length* correspondiente.

En base a estos resultados también se ha obtenido el coste aproximado de venta de los billetes del Hyperloop y se ha comparado con los que ofrecen algunas aerolíneas. Debido al elevado coste de construcción del Hyperloop, el precio de los billetes es muy elevado, llegando a superar, en varios casos, los 250 € por trayecto.

Así pues, el precio de venta sólo podrá ser menor si se reduce el coste de la infraestructura. Para ello, una opción evidente sería construir el Hyperloop sólo en zonas que no presenten grandes desniveles y así, evitar los túneles. Los diseñadores de *Hyperloop Alpha* obtuvieron un coste de la infraestructura menor que el calculado en este proyecto, principalmente por este motivo. Al no tener un desnivel pronunciado, sólo necesitarían construir 25 kilómetros de túnel y el coste total es de 6.000 millones de euros, frente a los 13.642 de media por ruta que se han obtenido en este estudio. Esto les permitiría ofrecer billetes más económicos y hacer, así, más competencia al sector aéreo.

Este hecho se puede comprobar en la ruta Ámsterdam – París. Se trata de la más corta de todas las propuestas y, además, tan sólo necesitaría 27 km de túnel. El precio de venta del billete para este caso, se sitúa entre el de una aerolínea de bajo coste y una *Legacy*. Un precio razonable para los clientes.

Trazar las rutas en línea recta también reduciría el coste de estructura, pero el hecho de no evitar las áreas urbanas implicaría tener que reducir la velocidad hasta los 480 km/h, y con lo cual, aumentar la duración del trayecto.

Otra opción que se puede plantear es si realmente es necesario que el tubo se alce sobre unos pilares. Teniendo en cuenta que cada pilar tiene un coste de 131.021 €, podría parecer una buena alternativa prescindir de ellos y diseñar el sistema para que no sean necesarios. En ese caso, se impediría que coches y/o personas cruzaran al otro lado de la estructura sin necesidad de rodearla.

Con un precio tan elevado, muy pocas personas estarían dispuestas a viajar en Hyperloop. Además, si la demanda fuera inferior a la considerada en este estudio, el coste por pasajero aumentaría y, por consiguiente, el precio de los billetes, entrando así en un bucle.

Otro aspecto relevante a tener en cuenta es la posibilidad de abrir y cerrar rutas que tienen las aerolíneas, sin necesidad de construir grandes estructuras. En el caso del Hyperloop, cerrar un trayecto por la falta de demanda, implicaría perder por completo la inversión realizada.

Finalmente se ha realizado una comparativa entre ambos medios en cuanto a seguridad operacional e impacto medioambiental.

Hay varios aspectos que comentar relativos a la seguridad. Los diseñadores de *Hyperloop Alpha* proponen esperar llegar al destino como solución a una emergencia médica de algún pasajero y, comparando con la aviación, parece una solución menos caótica. Pero si se trata de una emergencia médica que requiera de atención inmediata, será necesario parar todas las cápsulas del tubo y abandonarlo por una salida de emergencia, por lo que supondría prácticamente el mismo revuelo que si sucediera en un avión.

El hecho de que no necesite conductor, además de reducir el riesgo de accidente por factor humano, supone que no existan las comunicaciones aire-tierra y, con lo cual, también se reducen los problemas por interferencias electromagnéticas.

Teniendo en cuenta la inmunidad meteorológica y el prácticamente nulo riesgo de choque entre cápsulas (ya que todas circulan por el tubo, sin posibilidad de cruzarse unas con otras), el Hyperloop, tal y como afirman los diseñadores, puede llegar a ser más seguro que la aeronave. Sin embargo, serán necesarios datos empíricos antes de confirmarlo.

Por otra parte, cabe destacar que la aviación es una de las mayores fuentes de gases de efecto invernadero. Según la Comisión Europea²⁰, una persona que vuela de Londres a Nueva York (ida y vuelta) genera el mismo nivel de emisiones que el calentador de una casa utilizado durante un año entero. Por ello, optar por un modo de transporte respetuoso con el medio ambiente como el Hyperloop, podría reducir considerablemente la contaminación atmosférica con el paso de los años.

Se cree que el Hyperloop es un medio novedoso para implementarlo actualmente. A pesar de que el funcionamiento del sistema a nivel técnico esté estudiado con profundidad, se deberá hacer especial hincapié en el diseño de las rutas, para llevar a cabo solamente aquellas que sean totalmente rentables. También sería necesario un análisis de costes detallado a nivel profesional. Los cálculos realizados en este proyecto son aproximaciones que permiten analizar a groso modo el sistema, pero no de manera exacta. También sería necesario realizar un estudio de demanda profundo, ya que la capacidad dependerá totalmente de ésta.

A pesar de que el Hyperloop sea un medio de transporte atractivo, principalmente por su rapidez, se considera que sería más beneficioso emplear la red existente de aeropuertos que construir este innovador medio de transporte por varios motivos. A nivel económico, no sería necesario realizar una inversión tan elevada

²⁰ Institución de la Unión Europea que ostenta el poder ejecutivo y la iniciativa legislativa.

y, gracias a los avances tecnológicos, las aeronaves del futuro podrían ser totalmente eléctricas, lo que eliminaría la emisión de gases nocivos. Si la fuente de electricidad fuera renovable, la aviación no contribuiría al calentamiento global.

Además, para distancias largas, se podrían emplear aviones supersónicos. Actualmente, hay varios proyectos enfocados al desarrollo de aviones supersónicos, como el X-59 QueSST de la NASA o el Boom XB-1. El primero es un avión supersónico silencioso que se encuentra en la última fase de desarrollo pero que sólo está diseñado para demostrar la viabilidad de este tipo de aviones y no para transportar pasajeros. Por otro lado, el Boom XB-1 es un diseño no contaminante de la empresa Boom Supersonic²¹, por lo que sería la alternativa ideal al Hyperloop en trayectos largos.

Cabe considerar que, en el Hyperloop, la estructura se amortizaría únicamente a partir de las rutas construidas, mientras que, en la aviación, se rentabiliza gracias a los cientos de rutas que pueden operar desde un mismo aeropuerto.

²¹ Fundada en 2014, es una empresa emergente que se dedica a la tecnología aeroespacial supersónica. Tiene su sede en Denver, Colorado.

REFERENCIAS

- [1] AECOC Innovation hub, *Hyperloop: el concepto, la evolución y las dudas que aun rodean al futurista transporte de Elon Musk* (2016).
- [2] AENA, *Estadísticas de tráfico aéreo* (2004 - 2019).
- [3] OACI, *Crecimiento sostenido del tráfico de pasajeros y demanda de servicios de carga aérea en 2018*. (2018)
- [4] Space X, Tesla Motors, *Hyperloop Alpha* (2013).
- [5] Flightradar24, *Datos/historia* (2018).
- [6] IATA, *Schedule Reference Service Analyser*.
- [7] Eurocontrol, *Taxi times – Summer 2019* (2019)
- [8] David Levinson, Jean Michel Mathieu, David Gillen, Adib Kanafani, “The full cost of high-speed rail: an engineering approach”, *The Annals of Regional Science* (1997).
- [9] Boletín Oficial del Estado, “BOE-A-2013-12455”.
- [10] EasyJet, *Annual report and accounts* (2019).
- [11] Ryanair, *Annual report* (2019).
- [12] Lufthansa Group, *Annual report* (2019).
- [13] US Energy Information Administration, *Petroleum & other liquids: spot prices*.
- [14] CAPA – Centre for Aviation, *Unit cost analysis of Emirates, IAG, Virgin; about learning from a new model, not unpicking it* (2014).
- [15] CAPA – Centre for Aviation, *CASK analysis allows global airline unit cost benchmarking and strategic mapping* (2016).
- [16] Organización Mundial de la Salud, *Accidentes de tránsito* (2018).
- [17] Miguel Lozano Sánchez, “WRF simulation of the atmospheric conditions in some aircraft accidents”, *Universitat Politècnica de Catalunya* (2013).
- [18] Greenpeace, *Cambio climático* (2020).
- [19] Parlamento Europeo, *Emisiones de aviones y barcos: datos y cifras* (2019).
- [20] Grupo de investigación en consumo energético del transporte aéreo de la Universidad Autónoma de Madrid, “Consumo de energía y emisiones asociadas al transporte por avión”, *Monografía EnerTrans nº 14* (2013).

ANEXO A. Información complementaria al diseño de rutas del Hyperloop

ÁMSTERDAM – PARÍS



Fig. A.1 Perfil de elevación de la ruta Ámsterdam – París.
Fuente: *Google Earth Pro*



Fig. A.2 Radios de giro de la ruta Ámsterdam – París. Fuente: *Google Earth Pro*



Fig. A.3 Tramos de la ruta Ámsterdam – París. Fuente: *Google Earth Pro*

LISBOA – MADRID



Fig. A.4 Perfil de elevación de la ruta Lisboa – Madrid.
Fuente: *Google Earth Pro*

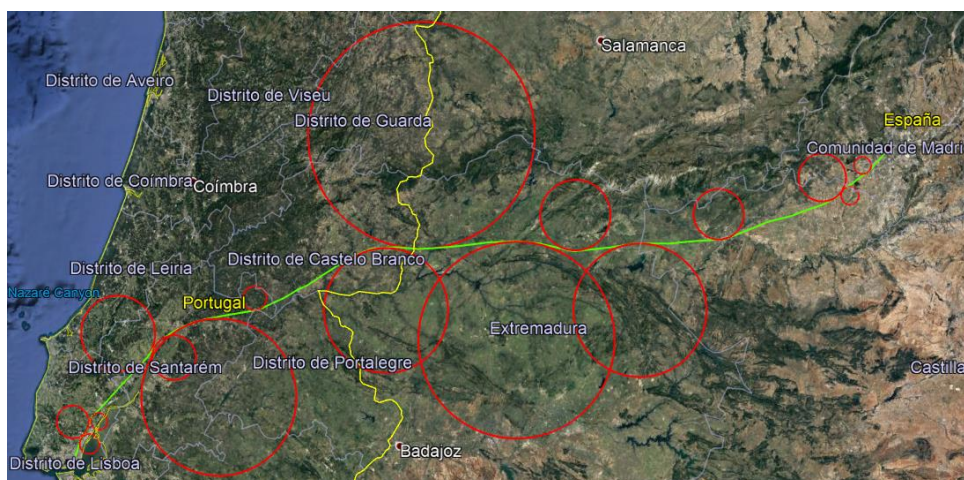


Fig. A.5 Radios de giro de la ruta Lisboa – Madrid. Fuente: *Google Earth Pro*



Fig. A.6 Tramos de la ruta Lisboa – Madrid. Fuente: *Google Earth Pro*

MADRID – ROMA



Fig. A.7 Perfil de elevación de la ruta Madrid – Roma.
Fuente: *Google Earth Pro*

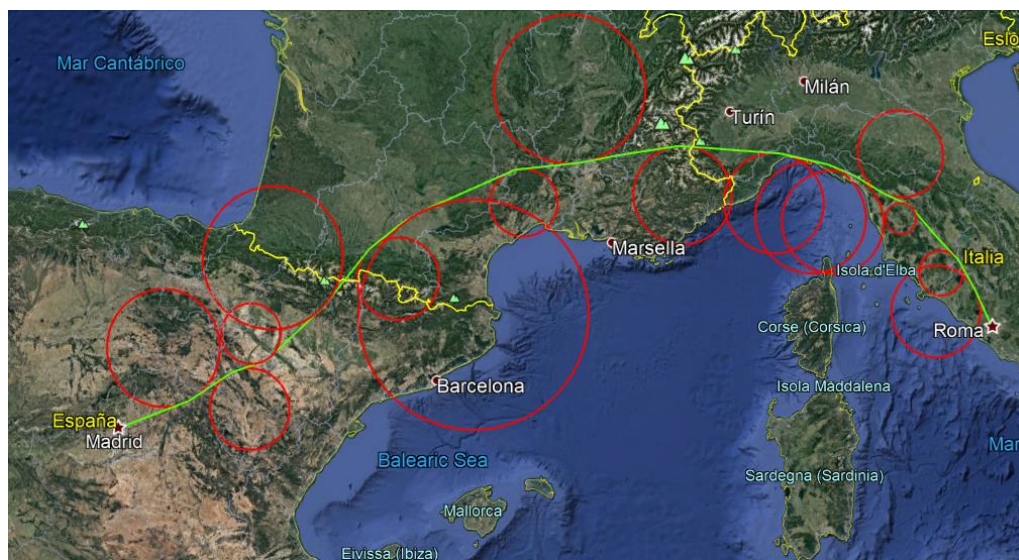


Fig. A.8 Radios de giro de la ruta Madrid – Roma. Fuente: *Google Earth Pro*



Fig. A.9 Tramos de la ruta Madrid – Roma. Fuente: *Google Earth Pro*

PARÍS – ROMA



Fig. A.10 Perfil de elevación de la ruta París – Roma. Fuente: *Google Earth Pro*



Fig. A.11 Radios de giro de la ruta París – Roma. Fuente: *Google Earth Pro*



Fig. A.12 Tramos de la ruta París – Roma. Fuente: *Google Earth Pro*

ANEXO B. Gráficas resultantes del diseño de las rutas

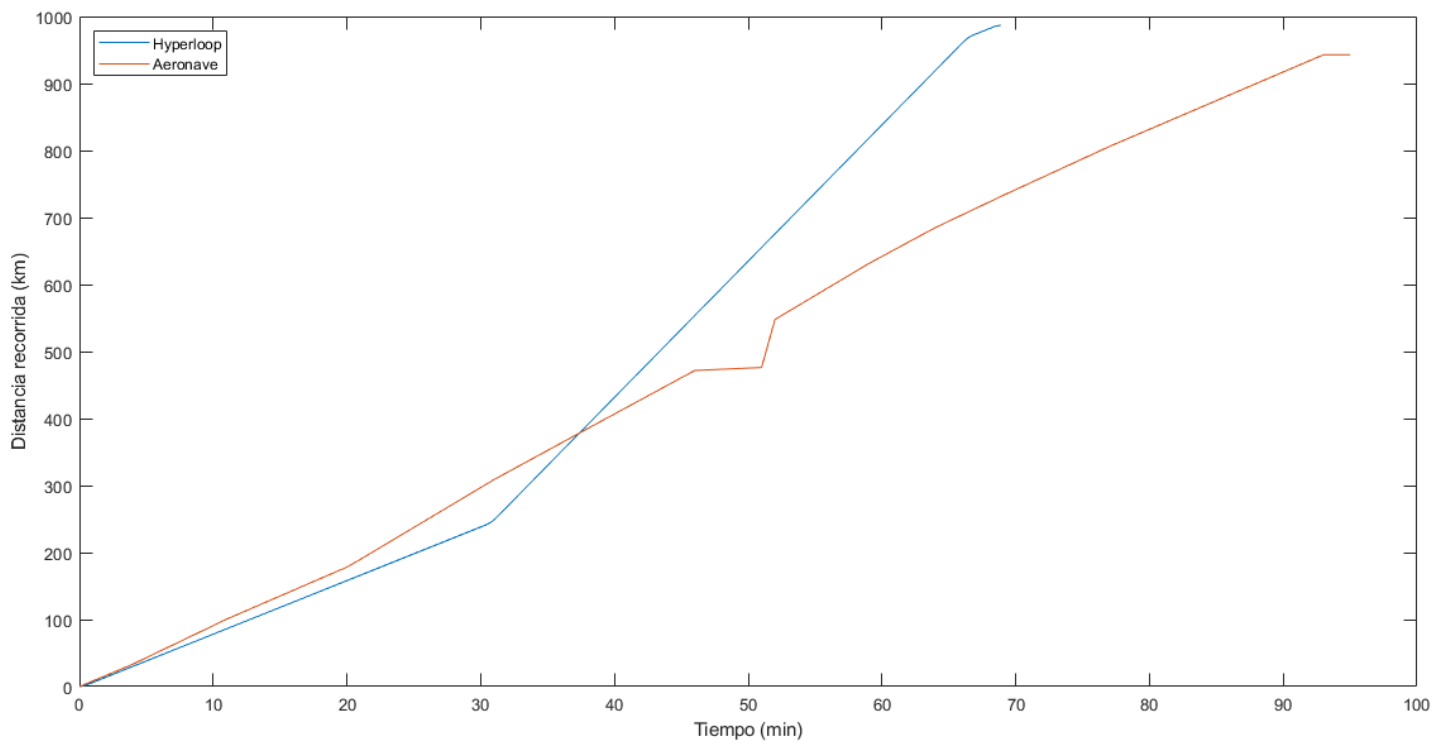


Fig. B.1 Distancia recorrida en función del tiempo (Barcelona – París). Fuente propia

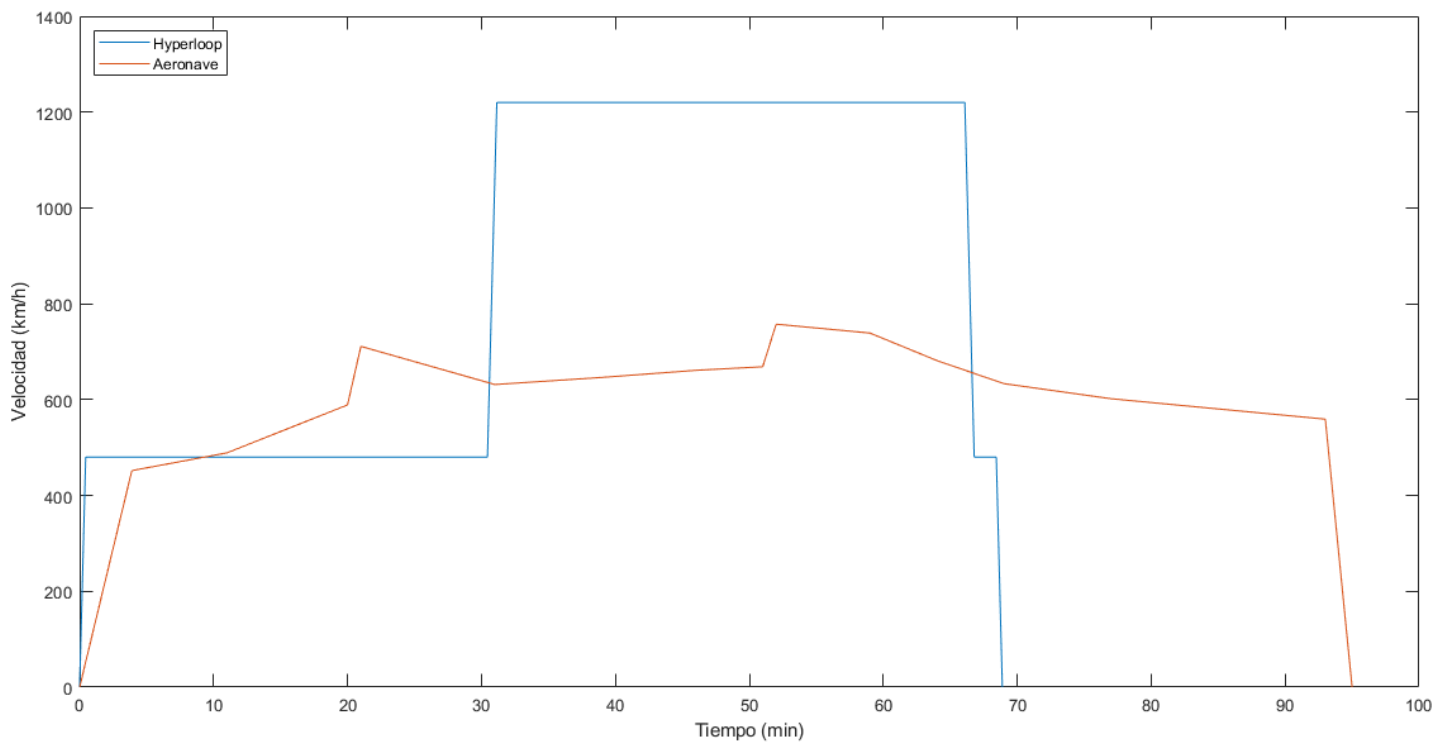


Fig. B.2 Velocidad en función del tiempo (Barcelona – París). Fuente propia

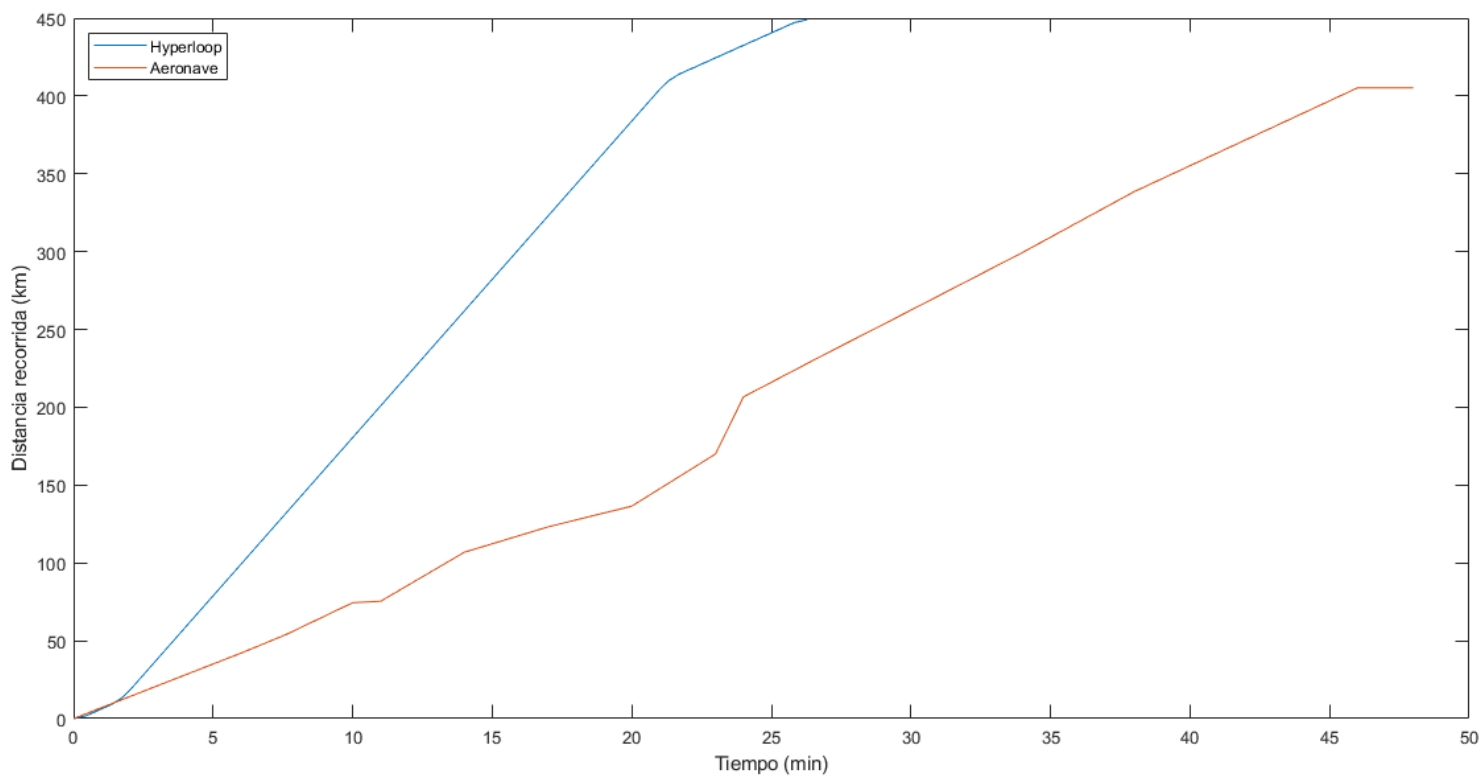


Fig. B.3 Distancia recorrida en función del tiempo (Ámsterdam – París). Fuente propia

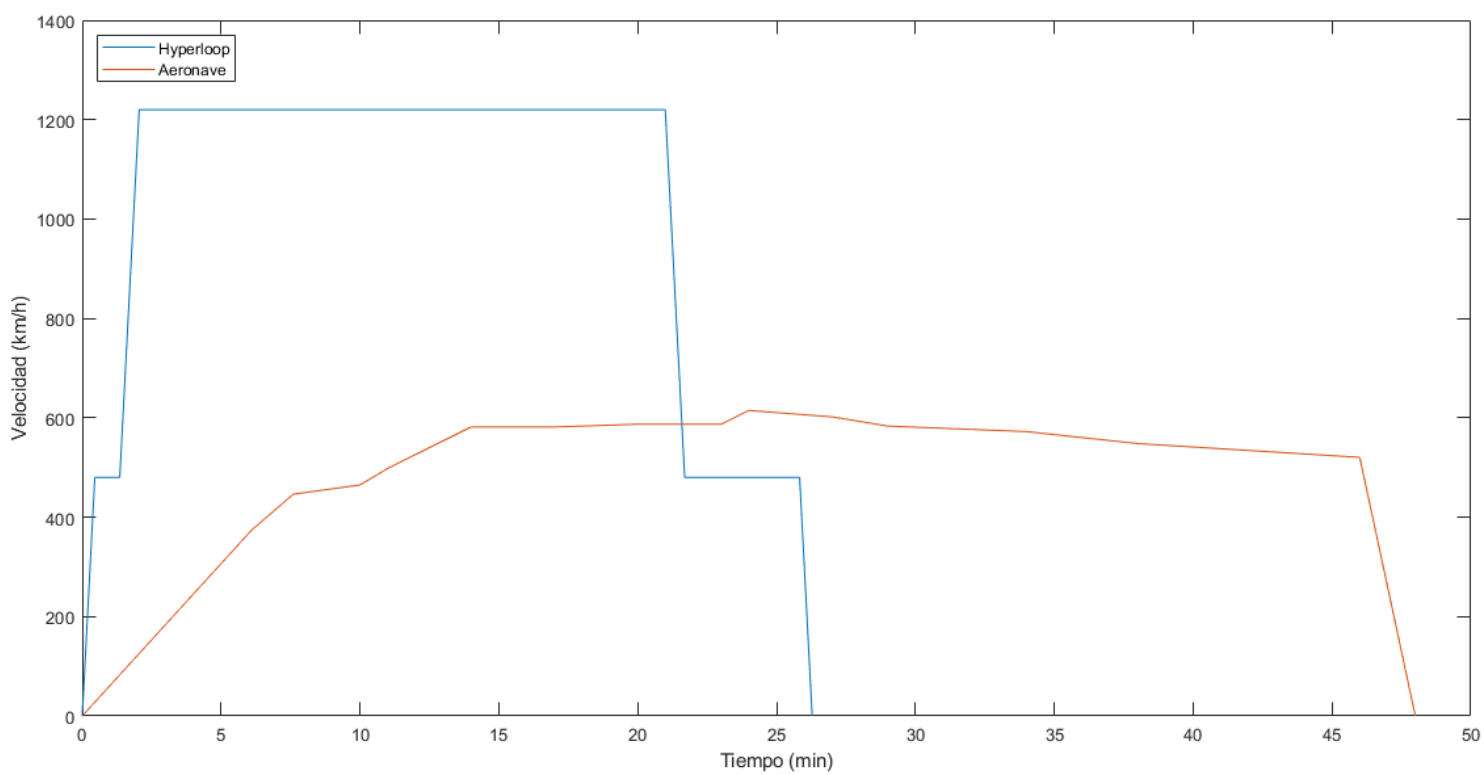


Fig. B.4 Velocidad en función del tiempo (Ámsterdam – París). Fuente propia

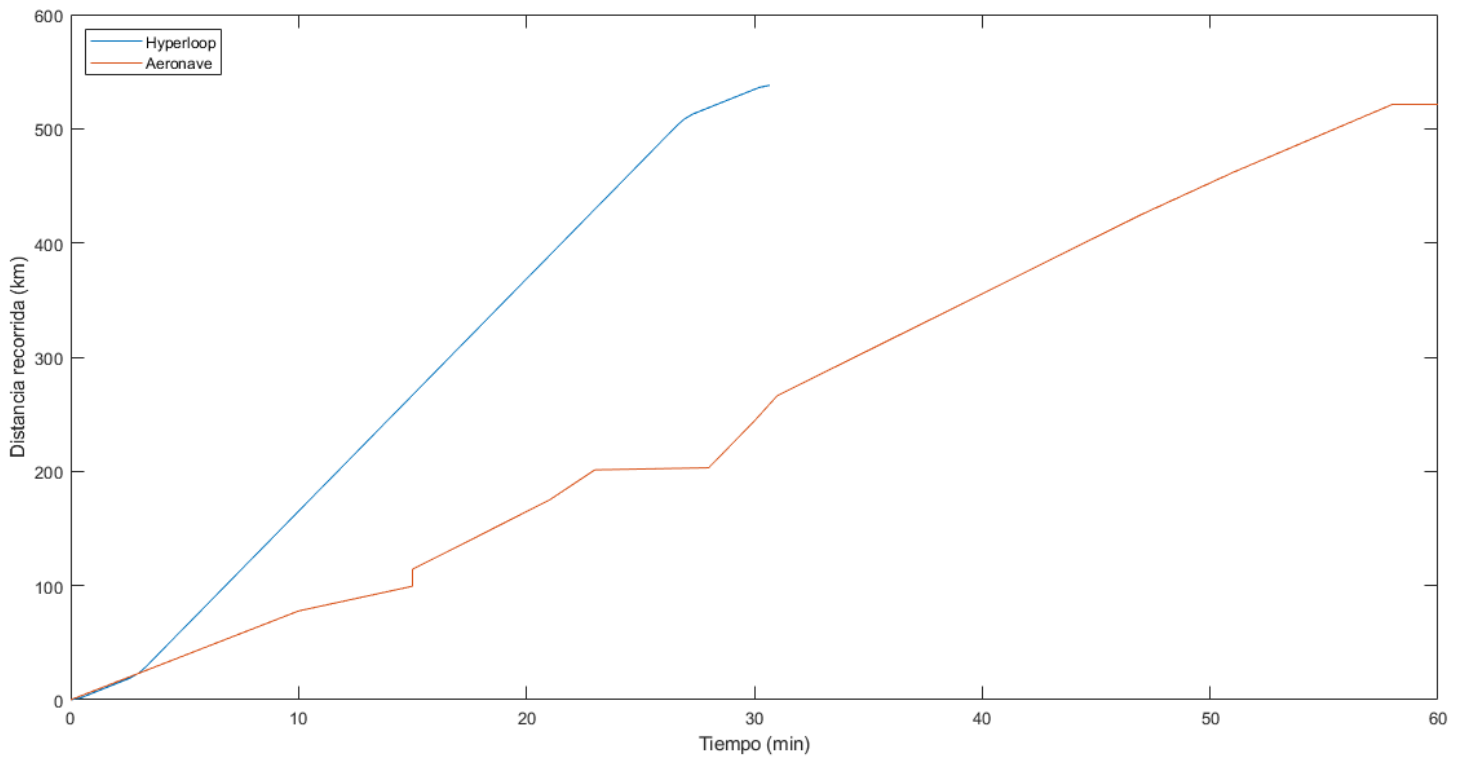


Fig. B.5 Distancia recorrida en función del tiempo (Lisboa – Madrid). Fuente propia

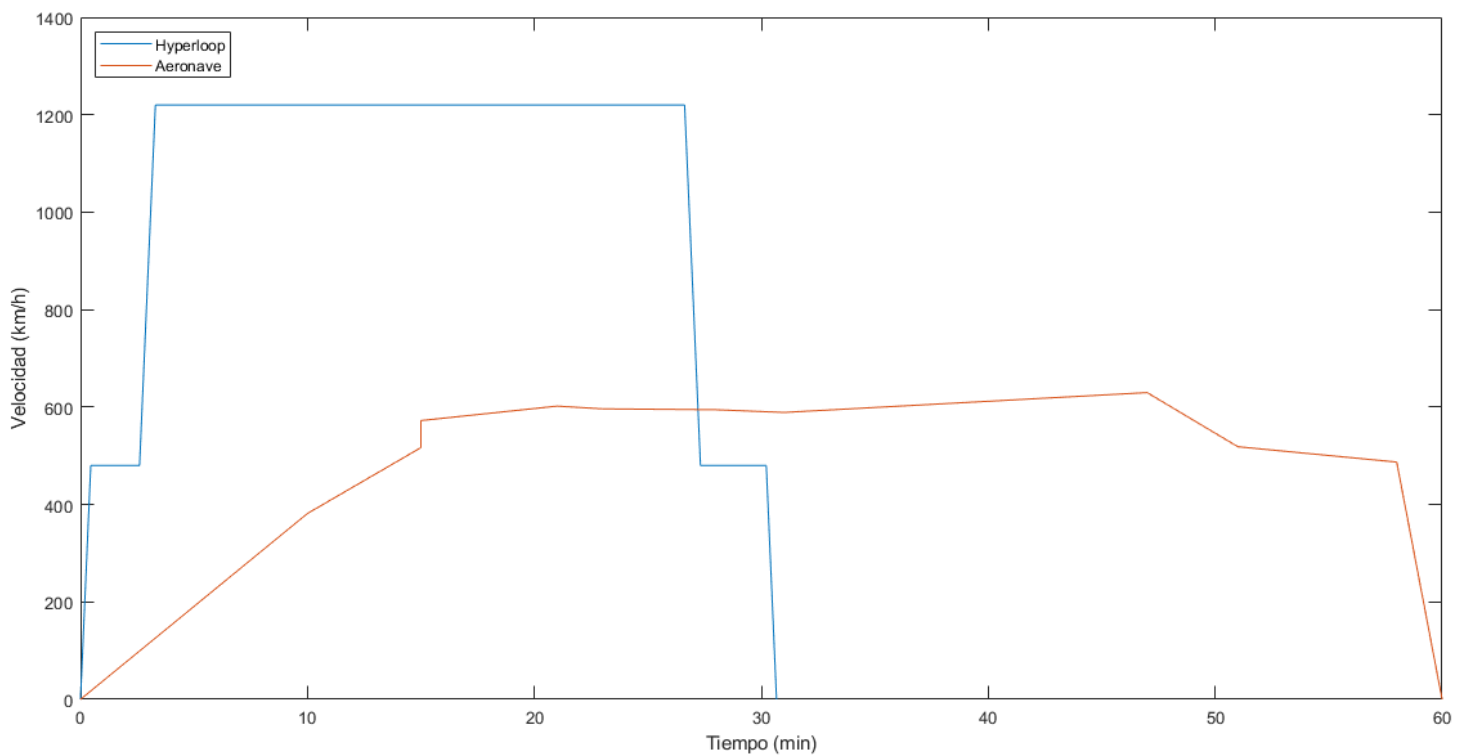


Fig. B.6 Velocidad en función del tiempo (Lisboa – Madrid). Fuente propia

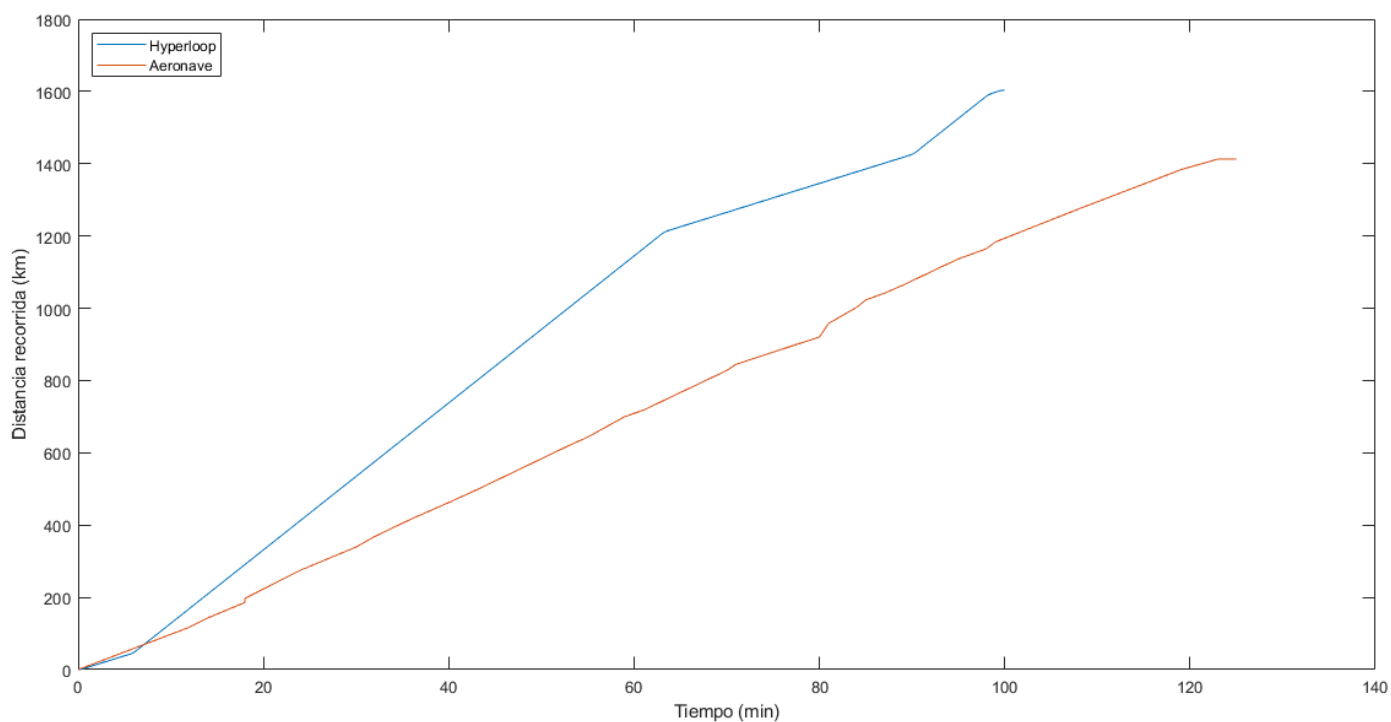


Fig. B.7 Distancia recorrida en función del tiempo (Madrid – Roma). Fuente propia

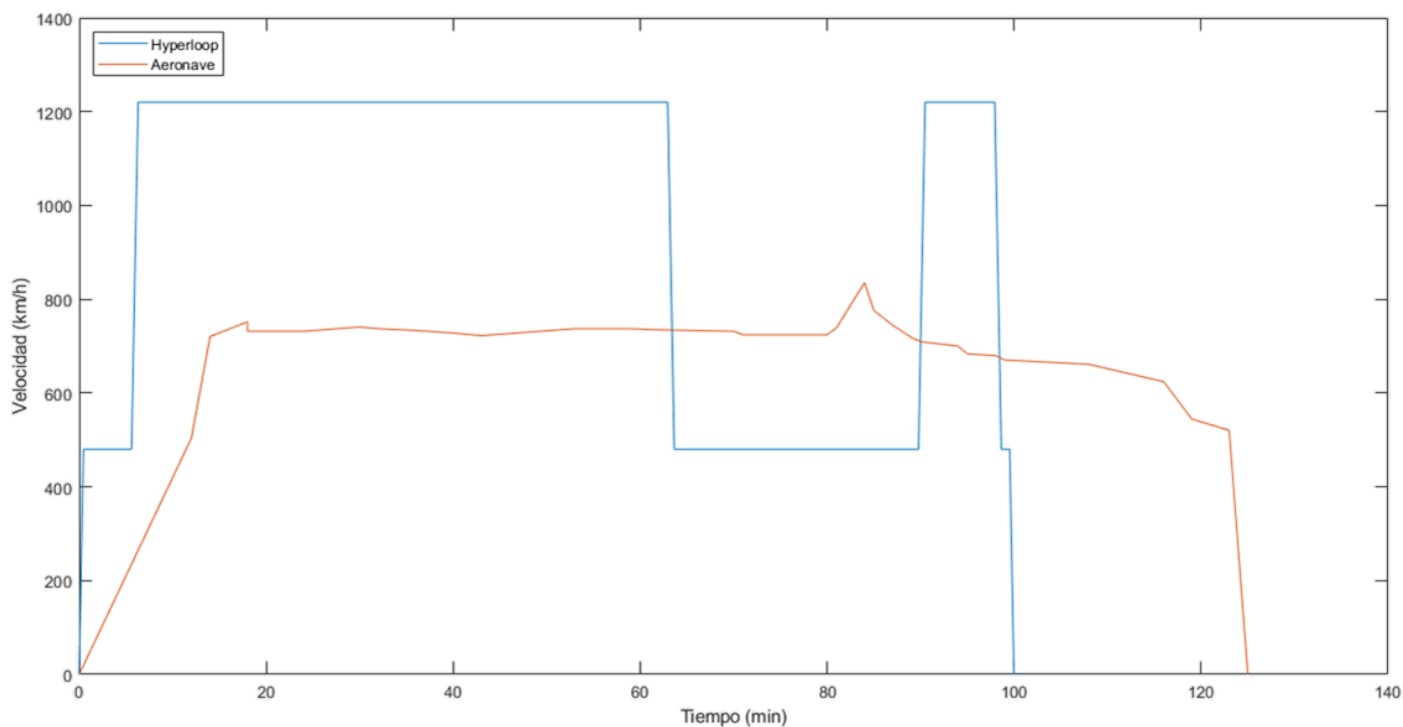


Fig. B.8 Velocidad en función del tiempo (Madrid – Roma). Fuente propia

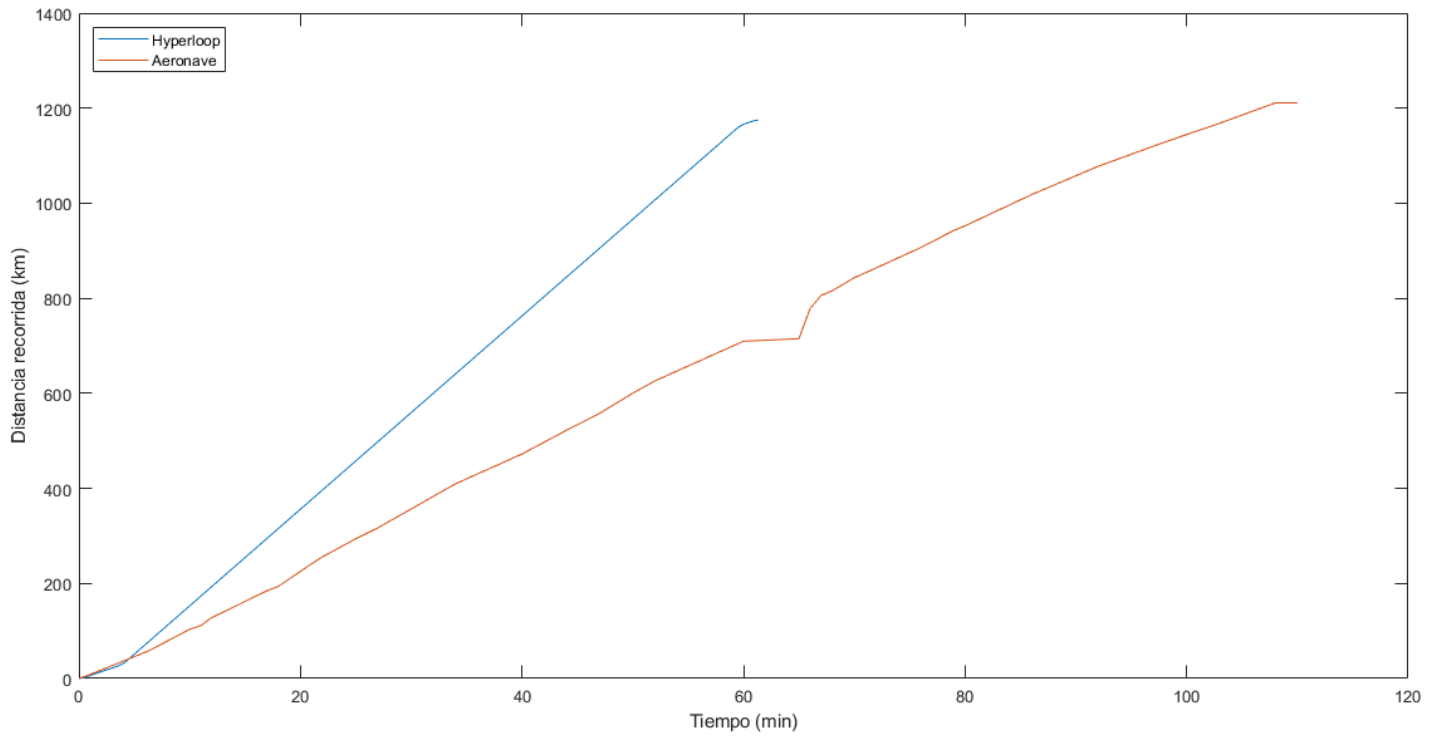


Fig. B.9 Distancia recorrida en función del tiempo (París – Roma). Fuente propia

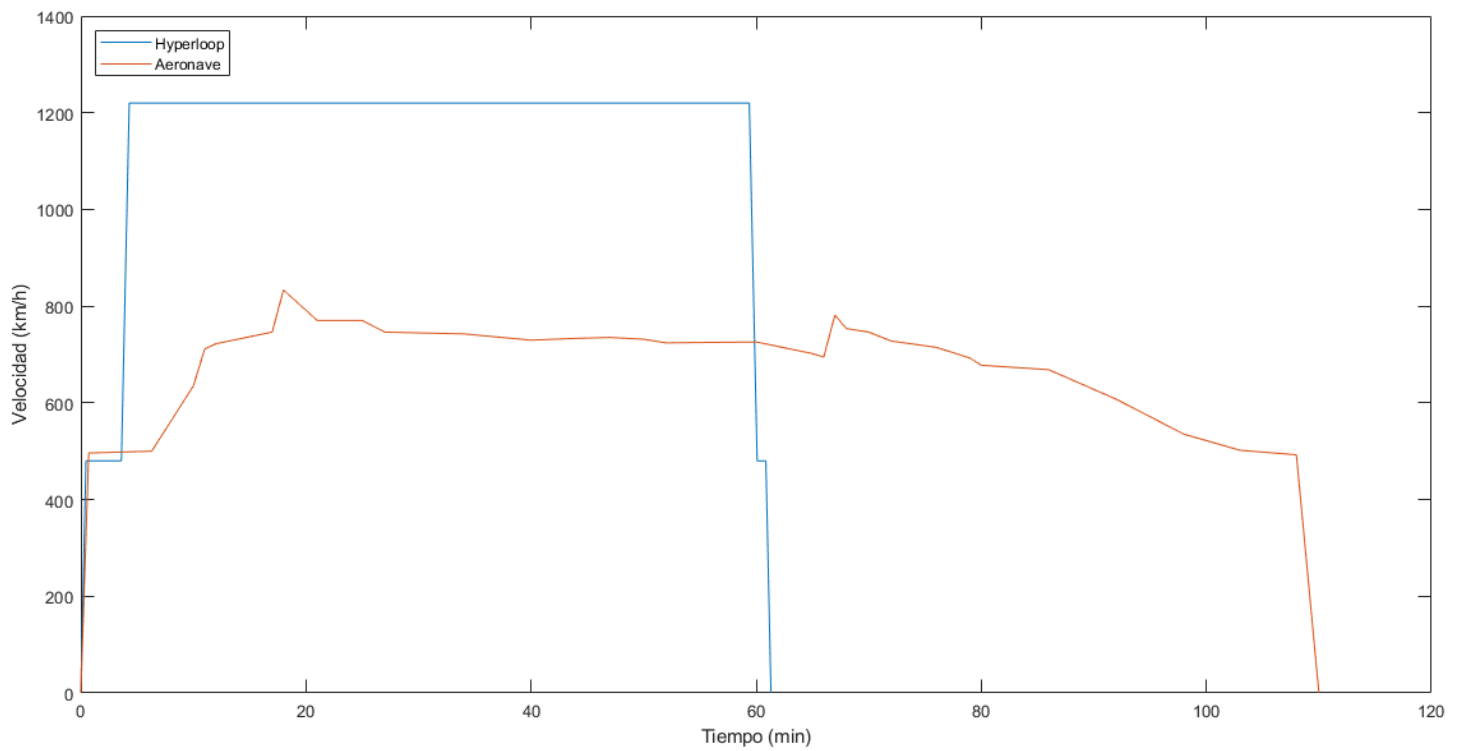


Fig. B.10 Velocidad en función del tiempo (París – Roma)

**ANEXO C. *Navigation Logs* de las rutas diseñadas
para el avión**

LEBL — LFPG

Block Time

IN: _____

OUT: _____

TOTAL: _____

Flight Time

ON: _____

OFF: _____

TOTAL: _____

Fuel Totals

START: _____

REMAIN: _____

USED: _____



Planned Route

OKABI6D OKABI UN861 TOU UN861 FISTO UY156 PERIG UT210 DIBAG UT210 TUDRA UT158 AMB CHN

Squawk Code

Clearance

Waypoint	Route	wDir	wSpd	TAS	Track	TH	MH	GS	Dist	ETE	ATE	Fuel	Fuel
	Altitude	Temp (dev)			WCA	Var				ETO	ATO	EFR	AFR
LEBL N 41°17.82' E 002°04.70'	OKABI6D	200°	8	249	253°	252°	252°	244	17.6	3.9		0.0	
VNV 380 N 41°12.64' E 001°42.35'	OKABI6D	21°	26	288	-1°	+0°	356°	264	36.7	3.9		0.0	
KARDO N 41°49.10' E 001°36.66'	OKABI6D	0°C (+5°)			+2°	+0°	356°	264	36.7	7.5		0.0	
OKABI N 42°36.97' E 001°29.01'	OKABI6D	17°	42	357	353°	356°	355°	318	48.2	11		0.0	
TOC N 42°37.19' E 001°28.98'	UN861	-31°C (+3°)			+3°	-1°	355°	318	48.2	8.3		0.0	
TOU 117.7 N 43°40.85' E 001°18.59'	UN861	7°	40	423	353°	355°	354°	384	0.2	20		0.0	
FISTO N 44°27.68' E 001°13.63'	UN861	-54°C (+0°)			+1°	-1°	354°	384	0.2	0.0		0.0	
PERIG N 45°07.03' E 000°58.17'	UN861	7°	40	380	353°	355°	354°	384	0.2	20		0.0	
TOD N 45°35.84' E 000°50.40'	UN861	-54°C (+0°)			+1°	-1°	354°	384	0.2	11		0.0	
DIBAG N 45°47.37' E 000°47.25'	UN861	7°	31	380	356°	357°	356°	349	47.0	31		0.0	
TUDRA N 46°32.33' E 000°46.85'	UY156	-55°C (-0°)			+1°	-0°	356°	349	47.0	8.0		0.0	
BEVOL N 47°00.72' E 000°55.85'	UY156	1°	24	380	344°	346°	347°	357	40.9	39		0.0	
AMB 113.7 N 47°25.74' E 001°03.87'	UY156	-55°C (-0°)			+1°	+1°	349°	361	29.3	46		0.0	
CHN 110.2 N 48°03.35' E 001°22.52'	UT210	348°	19	380	349°	349°	349°	361	29.3	4.9		0.0	
LFPG N 49°00.59' E 002°32.87'	UT210	-55°C (-1°)			-0°	-0°	349°	361	29.3	51		0.0	
	UT210	334°	16	425	349°	349°	348°	409	11.7	1.7		0.0	
	UT210	-55°C (-1°)			-1°	-0°	348°	409	11.7	52		0.0	
	UT210	334°	16	412	0°	359°	0°	399	45.0	7.0		0.0	
	UT158	-55°C (-1°)			-1°	+2°	0°	399	45.0	59		0.0	
	UT158	331°	15	378	12°	12°	14°	368	29.1	4.9		0.0	
	UT158	-52°C (-1°)			-0°	+2°	14°	368	29.1	1h04		0.0	
	UT158	358°	10	356	12°	13°	15°	342	25.6	4.6		0.0	
	UT158	-39°C (+1°)			+0°	+2°	15°	342	25.6	1h09		0.0	
	UT158	22°	14	337	18°	18°	18°	325	39.7	7.6		0.0	
	UT158	-29°C (+3°)			-0°	-1°	18°	325	39.7	1h17		0.0	
	UT158	13°	12	308	39°	37°	37°	302	73.9	16		0.0	
	UT158	-20°C (+4°)			-2°	+1°	37°	302	73.9	1h33		0.0	

EHAM — LFPG



Block Time

IN: _____

OUT: _____

TOTAL: _____

Flight Time

ON: _____

OFF: _____

TOTAL: _____

Fuel Totals

START: _____

REMAIN: _____

USED: _____

Planned Route

LEKKO N872 KUDAD N872 WOODY N872 NIK N872 DENOX N872 CIV N872 MEDIL UN872 PITHI UN872 LESDO UM728

Clearance

Waypoint	Route	wDir	wSpd	TAS	Track	TH	MH	GS	Dist	ETE	ATE	Fuel	Fuel
	Altitude	Temp (dev)			WCA	Var				ETO	ATO	EFR	AFR
EHAM N 52°18.48' E 004°45.85'	•D•	256°	16	206	180°	184°	184°	202	23.1	6.1		0.0	
LEKKO N 51°55.45' E 004°46.04'	↗	13°C (-2°)			+4°	+0°				6.1		0.0	
LARAS N 51°50.07' E 004°41.84'	↗	276°	27	251	206°	212°	210°	241	6.0	1.5		0.0	
		-5°C (+4°)			+6°	-1°				7.6		0.0	
KUDAD N 51°40.05' E 004°34.06'	↗	280°	30	260	206°	212°	211°	251	11.1	2.6		0.0	
		-10°C (+4°)			+6°	-1°				10		0.0	
TOC N 51°35.96' E 004°30.90'	↗	284°	31	277	206°	212°	211°	269	4.5	1.0		0.0	
		-18°C (+4°)			+6°	-1°				11		0.0	
WOODY N 51°24.34' E 004°21.99'	↗	286°	30	320	206°	211°	210°	314	12.9	2.5		0.0	
	20000	-21°C (+4°)			+5°	-1°				14		0.0	
NIK 117.4 N 51°09.90' E 004°11.03'	↗	286°	29	320	206°	211°	209°	314	16.0	3.1		0.0	
	20000	-21°C (+4°)			+5°	-1°				17		0.0	
DENOX N 50°52.77' E 004°01.67'	↗	286°	28	320	199°	204°	204°	317	18.1	3.4		0.0	
	20000	-21°C (+4°)			+5°	+0°				20		0.0	
TOD N 50°39.31' E 003°53.06'	↗	287°	25	320	202°	207°	205°	317	14.5	2.8		0.0	
	20000	-21°C (+4°)			+5°	-1°				23		0.0	
CIV 113.2 N 50°34.43' E 003°49.97'	↘	290°	23	334	202°	206°	205°	332	5.3	1.0		0.0	
		-21°C (+4°)			+4°	-1°				24		0.0	
MEDIL N 50°20.53' E 003°40.50'	↘	290°	23	327	204°	207°	206°	325	15.2	2.8		0.0	
		-20°C (+4°)			+4°	-1°				27		0.0	
PITHI N 50°11.44' E 003°34.37'	↘	291°	22	316	203°	207°	206°	315	9.9	1.9		0.0	
	UN872	-18°C (+4°)			+3°	-1°				29		0.0	
LESDO N 49°48.50' E 003°19.08'	↘	293°	19	309	203°	206°	205°	309	25.0	4.9		0.0	
	UN872	-13°C (+5°)			+3°	-1°				34		0.0	
KOVIN N 49°29.15' E 003°06.38'	↘	297°	17	291	203°	205°	205°	296	21.1	4.3		0.0	
	UM728	-10°C (+5°)			+2°	-0°				38		0.0	
LFPG N 49°00.59' E 002°32.87'	↘	315°	13	276	218°	220°	222°	281	36.0	8.1		0.0	
		-1°C (+5°)			+3°	+2°				46		0.0	

LPPT — LEMD



Block Time

IN: _____

OUT: _____

TOTAL: _____

Flight Time

ON: _____

OFF: _____

TOTAL: _____

Fuel Totals

START: _____

REMAIN: _____

USED: _____

Planned Route

MAGUM UN870 MOMAS UN870 PORLI UN870 RAKOD UN870 DIPOL UM871 NVS

Squawk Code

Clearance

Waypoint	Route	wDir	wSpd	TAS	Track	TH	MH	GS	Dist	ETE	ATE	Fuel	Fuel
	Altitude	Temp (dev)			WCA	Var				ETO	ATO	EFR	AFR
LPPT N 38°46.45' W 009°08.05'	•D•	7°	7	211	56°	54°	57°	206	42.0	10		0.0	
MAGUM N 39°10.05' W 008°23.55'	↗	22°C (+7°)			-1°	+3°				10		0.0	
MOMAS N 39°19.15' W 008°01.00'	UN870	340°	17	282	62°	59°	61°	279	19.7	4.0		0.0	
	↗	-17°C (+7°)			-3°	+2°				15		0.0	
TOC N 39°20.25' W 007°57.64'	UN870	317°	16	304	67°	64°	66°	309	2.8	0.5		0.0	
	↗	-29°C (+4°)			-3°	+2°				15		0.0	
PORLI N 39°31.73' W 007°21.98'	UN870	315°	15	320	67°	65°	66°	325	29.9	5.5		0.0	
	25000	-31°C (+4°)			-3°	+2°				21		0.0	
RODAP N 39°37.95' W 007°03.92'	UN870	326°	15	320	66°	63°	65°	322	15.3	2.8		0.0	
	25000	-31°C (+4°)			-3°	+1°				23		0.0	
RAKOD N 39°46.85' W 006°37.71'	UN870	333°	15	320	66°	63°	65°	321	22.1	4.1		0.0	
	25000	-31°C (+4°)			-3°	+1°				28		0.0	
UREDI N 39°51.59' W 006°23.60'	UN870	339°	15	320	66°	64°	65°	319	11.9	2.2		0.0	
	25000	-31°C (+4°)			-3°	+1°				30		0.0	
TOD N 39°54.74' W 006°14.15'	UN870	342°	16	320	67°	64°	65°	318	7.9	1.5		0.0	
	25000	-31°C (+4°)			-3°	+1°				31		0.0	
DIPOL N 40°24.99' W 004°40.58'	UN870	344°	16	342	67°	64°	65°	340	77.8	15		0.0	
	↘	-31°C (+4°)			-3°	+1°				47		0.0	
NVS 114.95 N 40°22.12' W 004°14.97'	UM871	347°	17	281	98°	95°	96°	280	19.8	4.3		0.0	
	↘	-29°C (+4°)			-3°	+1°				51		0.0	
LEMD N 40°28.33' W 003°33.65'	•D•	12°	13	267	79°	77°	78°	263	32.2	7.5		0.0	
	↘	-1°C (+8°)			-2°	+1°				58		0.0	

LEMD — LIRF

Block Time

IN: _____

OUT: _____

TOTAL: _____

Flight Time

ON: _____

OFF: _____

TOTAL: _____

Fuel Totals

START: _____

REMAIN: _____

USED: _____



Planned Route

SEGRE UN870 PISUS UN870 PONEN UN870 VILAR UN870 KARES UN870 BCN UN725 DIPES UN725 LAPIT UN725 OSPOK

Squawk Code

Clearance

Waypoint	Route	wDir	wSpd	TAS	Track	TH	MH	GS	Dist	ETE	ATE	Fuel	Fuel
	Altitude	Temp (dev)			WCA	Var				ETO	ATO	EFR	AFR
LEMD N 40°28.33' W 003°33.65'	\rightarrow	314°	2	272	58°	58°	59°	272	63.3	12		0.0	
SEGRE N 41°01.37' W 002°22.59'	UN870	23°C (+11°)	23	392	-0°	+1°	73°	389	14.0	12		0.0	
BRITO N 41°04.74' W 002°04.68'	UN870	-36°C (+2°)	28	411	-3°	+0°	72°	406	25.8	14		0.0	
TOC N 41°10.85' W 001°31.54'	UN870	-44°C (+1°)	32	400	-4°	+0°	72°	395	3.3	18		0.0	
PISUS N 41°11.62' W 001°27.30'	UN870	-54°C (+0°)	32	400	-5°	+0°	73°	395	42.2	0.5		0.0	
PONEN N 41°12.23' W 000°32.86'	UN870	-54°C (+0°)	38	400	-5°	+1°	85°	400	34.6	18		0.0	
SEROX N 41°20.80' E 000°13.12'	UN870	-54°C (+0°)	41	400	-5°	-0°	85°	398	15.7	6.4		0.0	
VILAR N 41°20.50' E 000°33.96'	UN870	-54°C (+1°)	43	400	-6°	-0°	84°	396	26.5	24		0.0	
KARES N 41°19.86' E 001°09.13'	UN870	-53°C (+1°)	47	400	-6°	-1°	84°	393	24.3	30		0.0	
BISES N 41°19.11' E 001°41.35'	UN870	-53°C (+1°)	51	400	-7°	-1°	84°	390	18.9	2.4		0.0	
BCN 116.7 N 41°18.43' E 002°06.47'	UN725	-53°C (+2°)	53	400	-7°	-1°	95°	398	66.5	40		0.0	
DIPES N 41°03.78' E 003°32.40'	UN725	-53°C (+2°)	35	400	-8°	+0°	97°	398	12.4	10		0.0	
TOSNU N 41°00.92' E 003°48.41'	UN725	-49°C (+6°)	29	400	-5°	-1°	98°	398	30.6	53		0.0	
LAPIT N 40°53.72' E 004°27.69'	UN725	-48°C (+6°)	15	400	-4°	-1°	100°	397	9.6	1.9		0.0	
OSPOK N 40°51.42' E 004°40.00'	UN725	-47°C (+7°)	11	400	-2°	-2°	94°	395	59.3	4.6		0.0	
NOLVI N 40°43.90' E 005°57.38'	UN725	-47°C (+7°)	11	400	-1°	-2°	98°	391	9.2	59		0.0	
INKIR N 40°42.65' E 006°09.43'	UN725	-48°C (+6°)	13	400	+1°	-1°	98°	391	61.2	1.5		0.0	
ORKUM N 40°33.83' E 007°28.97'	UN725	-48°C (+6°)	20	400	+1°	-1°	85°	399	3.4	1.4		0.0	
TOD N 40°34.22' E 007°33.34'	M603	-49°C (+6°)	21	452	+3°	-1°	85°	451	20.4	1h01		0.0	
ELSAG N 40°36.48' E 008°00.00'		-49°C (+6°)			+3°	-1°				1h10		0.0	
										1h11		0.0	
										1h20		0.0	
										1h21		0.0	
										1h24		0.0	

LFPG — LIRF

Block Time

IN: _____

OUT: _____

TOTAL: _____

Flight Time

ON: _____

OFF: _____

TOTAL: _____

Fuel Totals

START: _____

REMAIN: _____

USED: _____



Planned Route

DUCRA UM728 RESMI UL612 ODEBU UL612 OKASI UL612 OKEPI UL612 OKIRA UL612 MOU UL612 MADIV UL612 MOKIP

Squawk Code

Clearance

Waypoint	Route	wDir	wSpd	TAS	Track	TH	MH	GS	Dist	ETE	ATE	Fuel	Fuel
	Altitude	Temp (dev)			WCA	Var				ETO	ATO	EFR	AFR
LFPG N 49°00.59' E 002°32.87'	\rightarrow	320° 7	7	262	153°	154°	155°	268	3.0	0.7		0.0	
DUCRA N 48°57.90' E 002°34.92'	\rightarrow	18°C (+3°)			+0°	+1°				0.7		0.0	
RESMI N 48°34.12' E 002°11.52'	UM728 \rightarrow	320° 7	7	268	213°	215°	214°	270	28.4	5.6		0.0	
ODEBU N 48°16.87' E 002°37.57'	\rightarrow	13°C (+2°)			+1°	-1°				6.3		0.0	
OGULO N 48°13.10' E 002°40.15'	UL612 \rightarrow	330° 12	12	331	135°	134°	135°	343	24.5	4.0		0.0	
OKASI N 48°05.00' E 002°46.67'	\rightarrow	-11°C (+5°)			-1°	+1°				10		0.0	
OKEKO N 47°32.42' E 003°07.23'	UL612 \rightarrow	324° 13	13	372	155°	156°	155°	384	4.1	0.6		0.0	
TOC N 47°27.09' E 003°10.55'	\rightarrow	-29°C (+3°)			+0°	-1°				11		0.0	
OKEPI N 47°08.72' E 003°21.90'	UL612 \rightarrow	320° 12	12	378	152°	152°	153°	390	9.2	1.4		0.0	
OKIRA N 47°01.32' E 003°26.43'	\rightarrow	-32°C (+2°)			+0°	+1°				12		0.0	
MOU 116.7 N 46°42.41' E 003°37.90'	UL612 \rightarrow	314° 13	13	391	157°	158°	157°	403	35.4	5.0		0.0	
MADIV N 46°39.43' E 003°55.42'	\rightarrow	-37°C (+1°)			+1°	-1°				17		0.0	
MOKIP N 46°26.93' E 003°05.62'	UL612 \rightarrow	326° 16	16	435	157°	158°	158°	450	5.8	0.8		0.0	
MILPA N 46°18.15' E 003°52.78'	\rightarrow	-54°C (-2°)			+0°	+1°				18		0.0	
PERAK N 46°02.78' E 006°24.58'	UL612 \rightarrow	328° 16	16	400	157°	157°	158°	416	19.9	2.9		0.0	
MOBLO N 45°48.58' E 006°43.36'	\rightarrow	-56°C (-1°)			+0°	+1°				21		0.0	
LURAG N 45°31.67' E 007°05.33'	UL612 \rightarrow	345° 16	16	400	157°	157°	158°	416	8.0	1.2		0.0	
OBUXA N 45°24.27' E 007°22.23'	\rightarrow	-56°C (-1°)			-0°	+1°				22		0.0	
ASTIG N 44°56.50' E 008°17.42'	UL612 \rightarrow	351° 17	17	400	157°	157°	158°	416	20.5	3.0		0.0	
LAGEN N 44°23.65' E 008°29.88'	\rightarrow	-56°C (-1°)			-1°	+1°				25		0.0	
	UL612 \rightarrow	4° 19	19	400	104°	101°	101°	403	12.4	1.9		0.0	
	\rightarrow	-55°C (-1°)			-3°	-0°				27		0.0	
	UL612 \rightarrow	8° 19	19	400	104°	101°	101°	401	50.0	7.5		0.0	
	\rightarrow	-55°C (-1°)			-3°	+0°				34		0.0	
	UL612 \rightarrow	29° 23	23	400	105°	102°	102°	394	33.8	5.2		0.0	
	\rightarrow	-55°C (-1°)			-3°	+0°				40		0.0	
	UL612 \rightarrow	41° 26	26	400	125°	121°	119°	396	26.9	4.1		0.0	
	\rightarrow	-55°C (-1°)			-4°	-2°				44		0.0	
	\rightarrow	51° 29	29	400	137°	133°	132°	397	19.3	2.9		0.0	
	\rightarrow	-55°C (-0°)			-4°	-1°				47		0.0	
	UM135 \rightarrow	59° 23	23	400	138°	134°	132°	395	22.9	3.5		0.0	
	\rightarrow	-55°C (-0°)			-3°	-2°				50		0.0	
	Q223 \rightarrow	88° 11	11	400	122°	121°	119°	391	14.0	2.2		0.0	
	\rightarrow	-55°C (-0°)			-1°	-2°				52		0.0	
	Q223 \rightarrow	148° 8	8	400	125°	126°	123°	392	47.9	7.3		0.0	
	\rightarrow	-55°C (-0°)			+0°	-2°				1h00		0.0	
	\rightarrow	178° 21	21	400	165°	165°	163°	379	34.0	5.4		0.0	
	\rightarrow	-55°C (-1°)			+1°	-3°				1h05		0.0	

ANEXO D. Desglose de costes del Hyperloop

Tabla D.1 Desglose del coste de una cápsula de pasajeros. Fuente: *Hyperloop Alpha*

Vehicle Component	Cost (\$)
Capsule Structure & Doors:	\$ 245,000
Interior & Seats:	\$ 255,000
Propulsion System:	\$ 75,000
Suspension & Air Bearings:	\$ 200,000
Batteries, Motor & Coolant:	\$ 150,000
Air Compressor:	\$ 275,000
Emergency Braking:	\$ 50,000
General Assembly:	\$ 100,000
Passengers & Luggage:	N/A
Total/Capsule:	\$ 1,350,000

Tabla D.2 Desglose del coste de la estructura principal. Fuente: *Hyperloop*

Component	Cost (million USD)
Tube	5,410
Tube Construction	650
Pylon Construction	2,550
Tunnel Construction	600
Propulsion	140
Solar Panels & Batteries	210
Station & Vacuum Pumps	260
Permits & Land	1,000

